

И. Х. КЭЛИШ

Микроминиатюрная электроника

МАССОВАЯ
РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 873

И. Х. КЭЛИШ

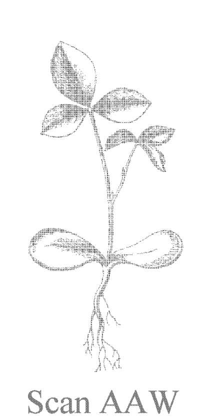
Микроминиатюрная электроника

Перевод с английского
В. С. ПЕРШЕНКОВА



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1975



6Ф0.3
К 98
УДК 621.396.1

Кэлиш И. Х.

К 98 Микроминиатюрная электроника. Пер. с англ. М., «Энергия», 1975.
216 с. с ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 873)

Книга в популярной форме объясняет и иллюстрирует основные принципы микроэлектроники. На базе простых моделей описаны цифровые и аналоговые схемы и способы их изготовления в микроэлектронном исполнении. Дано описание проблем и достижений в области больших интегральных схем.

В целях лучшего усвоения содержания книги выбран метод объяснения материала с привлечением программированных форм.

Книга рассчитана на широкий круг радиолюбителей.

К $\frac{30407\text{-}034}{051(01)\text{-}75}$ 336-75 6Ф0.3

Israel H. Kalish

Microminiature Electronics

Howard W. Sams and Co., Inc.
The Bobbs-Merrill Co., Inc.
Indianapolis, Kansas city, New York, 1967

Израиль Х. Кэлиш

Микроминиатюрная электроника

Редактор издательства **Г. Н. Астафуров**
Редактор **А. Н. Мошков**
Технический редактор **Г. Г. Самсонова**
Корректор **А. К. Улегова**

Сдано в набор 25/IX 1974 г. Подписано к печати 16/XII 1974 г. Формат 84×108$^{1}/_{32}$. Бумага типографская № 2. Усл. печ. л. 11,34. Уч.-изд. л. 14,42
Тираж 75000 экз. Зак. 356. Цена 73 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Книга объясняет и иллюстрирует основные принципы микроэлектроники. Они поясняются на основе простейших, хорошо известных приборов.

Наряду с этим книга знакомит читателя с многочисленными технологическими приемами микроэлектронного производства. Читатель может изучить основные пути миниатюризации электронного оборудования. Эти вопросы в книге описаны достаточно подробно с выделением отдельных глав по технологии дискретных элементов, тонкопленочным методам и полупроводниковым интегральным схемам. Особое внимание уделено полупроводниковым схемам и приборам, для которых теория и методы производства описаны подробно и в простой форме.

Отзывы о книге просим направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая набережная, 10, издательство «Энергия», редакция Массовой радиобиблиотеки.

Редакция Массовой радиобиблиотеки

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Успехи микроэлектроники и микроэлектронной технологии вызвали современную революцию в проектировании электронных систем. Миниатюризация и повышение надежности электронных систем возрастающей сложности потребовали создания новых приборов, совершенствования технологии и технических средств их изготовления, что в свою очередь дало разработчику электронной аппаратуры новые широкие возможности.

Микроэлектроника — это электроника века космоса. Ее применение особенно ощутимо в области ракетной и космической техники. Однако в последнее время наблюдается все более широкое использование микроэлектроники в самых различных областях промышленности, быта и т. п. Поэтому изучение основ микроэлектроники не столько подготавливает читателя к применению ее в аппаратуре, сколько служит для понимания тех изменений в проектировании бытового и промышленного электронного оборудования, которые произойдут в будущем.

Усвоение материала книги позволит понять основы микроэлектроники, необходимую терминологию и даст возможность читателю обсуждать и оценивать значение новых достижений в этой области. Материал книги будет служить превосходным фундаментом для дальнейшего более детального ознакомления с огромной областью микроэлектронного производства.

И. Х. Кэлиш

КАК РАБОТАТЬ С КНИГОЙ

В целях лучшего усвоения читателем содержания книги весь текст разбит на отдельные секции, где описывается какой-либо вполне самостоятельный вопрос, с привлечением достаточного для его понимания количества рисунков. В конце каждой секции имеются контрольные вопросы по прочитанному материалу. Большинство из этих вопросов представлены в виде утверждения, требующего от читателя заполнить одно или несколько пропущенных слов, другие вопросы проверяют понимание того или иного положения.

Вниманию читателей предлагаются несколько весьма полезных рекомендаций, следуя которым, он может получить большую пользу от прочтения этой книги.

1. Читайте каждое предложение внимательно, обдумывая его. В тексте нет ненужных слов или фраз. Каждое предложение дает новую или подчеркивает известную мысль, которая очень важна для понимания электроники.

2. Когда Вы встречаете ссылку на иллюстрацию, остановитесь в конце читаемого предложения и изучите иллюстрацию. Убедитесь, что Вы запомнили ее смысл. Затем продолжайте чтение, возвращаясь к иллюстрации каждый раз, когда требуется уточнение каких-либо подробностей. Рисунки в книге специально подобраны таким образом, чтобы закрепить усвоение предмета.

3. В конце каждой секции Вы найдете один или несколько вопросов. Ответы на некоторые из них требуют заполнения пропущенных слов. Очень важно, чтобы Вы делали это письменно, используя данную книгу или отдельный листок бумаги. Процесс написания способствует гораздо лучшему запоминанию ответа, чем простое осмысливание. Большинство ответов весьма короткие, так что их написание не требует много времени.

4. Если Вы не знаете ответа после просмотра соответствующего текста, составьте ответы на оставшиеся вопросы. Если ответ на любой из пропущенных вопросов не становится ясным и после этого, прочтите ответ.

5. В случае неправильного ответа вернитесь к соответствующему параграфу или странице и пересмотрите материал. Знание правильного ответа на вопрос менее важно, чем понимание того, почему ответ был неверным. Новый материал каждой секции основан на предыдущей информации. Ослабление связи в этой цепи затрудняет усвоение последующего материала.

6. Тщательно изучите сводные вопросы в конце каждой главы. Этот своеобразный обзор поможет оценить усвоение изложенного материала и активизировать его. Если Вы встретите неясные вопросы, то вернитесь снова к тексту и перепроверьте вопросы и ответы перед изучением новой главы.

7. Заканчивайте чтение книги ответами на заключительные вопросы, которые, включая обзор всего материала, помогут Вам понять, насколько хорошо усвоена книга. Эти вопросы вскроют также Ваши пробелы и, возможно, помогут создать собственное мировоззрение в рассматриваемой области.

Глава первая

ВВЕДЕНИЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКУ

С чем Вы познакомитесь в этой главе. Электроника — наука об управлении движением потока электронов в системах передачи информации. Так, например, давление звуковых волн на микрофон преобразуется в передачу огромной мощности на радиостанции, отверстие на перфокарте дает команду для выполнения сложной математической операции. Электронные функции могут быть реализованы соответствующим соединением таких элементов, как лампы, транзисторы, катушки индуктивности, резисторы, конденсаторы и др. Вакуумная радиолампа положила начало развитию электроники, транзистор расширил ее возможности. Сейчас электроника стоит перед лицом новой революции — микроминиатюризации — резкого сокращения физического объема систем.

Ниже Вы познакомитесь с некоторыми методами микроминиатюризации, областями ее применения и рассмотрите ряд проблем, связанных с новым этапом развития электроники.

1-1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Микроминиатюризация—выполнение электронных функций при условии использования минимального физического объема.

Повышение плотности упаковки — размещение соответствующих элементов в объеме, размеры которого лимитируются условиями отвода тепла и механическими соображениями. На рис. 1-1, *а* иллюстрируется возможность использования печатных плат на примере соединения резисторов и диодов.

Миниатюризация элементов — лучшим примером этого служат слуховые аппараты, общее уменьшение размеров которых стало возможным вследствие использования специально разработанных микрофонов, транзисторов, наушников и батареек. Этот путь микроминиатюризации часто сочетается с высокой плотностью упаковки.

Стандартизация форм — иллюстрируется на примере микромодуля (рис. 1-1, *б*), где в качестве стандартной формы для отдельного элемента выбрана форма вафли. Все элементы изготавливаются по этому стандарту. Использование миниатюрных элементов стандартной формы позволяет получить выигрыш при соединении их в схемы и повышает плотность упаковки электронного оборудования в целом.

Интегральная схема — схема, выполняющая определенные электронные функции в отдельном корпусе. Используя интег-

ральные схемы для проектирования электронных устройств, конструктор имеет дело не с отдельными элементами внутри корпуса. Например, если интегральная схема — усилитель, то конструктор просто выбирает схему, коэффициент усиления которой удовлетворяет его аппаратурным требованиям. Вопросы же выбора элементов и их соединения для достижения определенного коэффициента усиления решаются на этапе изготовления самой микросхемы.

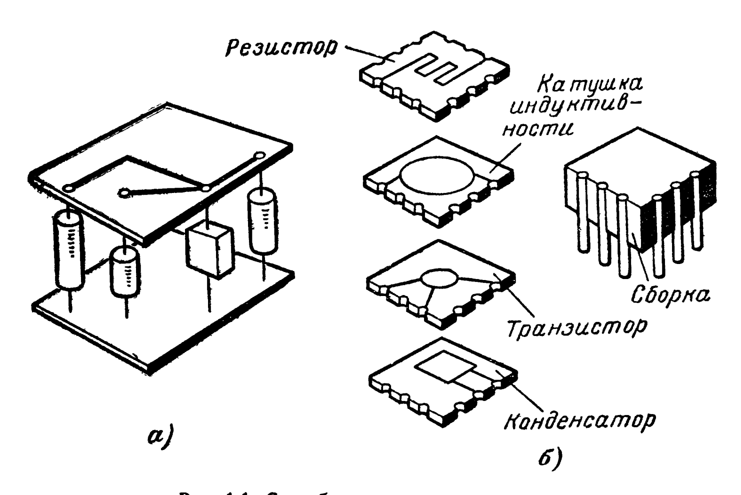


Рис. 1-1. Способы микроминиатюризации.

а — соединение элементов различных размеров «штабельным» способом; *б* — стандартизация форм при соединении в модульную конструкцию.

Сравнение размеров. В табл. 1-1 показана сравнительная эффективность различных способов размещения электронных элементов в заданном объеме. Заметим, что даже простейшие пути миниатюризации приводят к значительному увеличению плотности упаковки, в то же время результаты даже самой передовой техники еще крайне далеки от плотности упаковки нейронов в человеческом мозге.

Таблица 1-1

Способ	Количество условных электронных элементов в 1 м³
Обычные схемы	Менее 100
Печатные платы	5000
Микромодули	500 000
Интегральные схемы	1 000 000 000
Человеческий мозг	100 000 000 000

ВОПРОСЫ

1. **Печатные платы — один из примеров . . . . упаковки.**
2. **Микромодули — комбинация использования . . . . и . . . .**
3. **В случае использования . . . . схем характеристики отдельных элементов не могут быть точно определены.**
4. **Использование печатных плат позволяет увеличить плотность упаковки более чем в . . . . раз.**
5. **Максимальиая плотность упаковки в микроэлектронике достигается путем использоваиия . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Печатные платы — один из примеров **повышения плотности** упаковки.
2. Микромодули — комбинация использования **миниатюризации элементов** и **стандартизации форм.**
3. В случае использования **интегральных** схем характеристики отдельных элементов не могут быть точно определены.
4. Использование печатных плат позволяет увеличить плотность упаковки более чем в **50** раз.
5. Максимальная плотность упаковки в микроэлектронике достигается путем использования **интегральных схем.**

На рис. 1-2 сравниваются размеры обычного двухсотомного резистора и его интегрального аналога, выполненного на пластине кремния. Объем, занимаемый элементом, уменьшается примерно в 100 000 раз. Необходимо, однако, заметить, что это относится к уменьшению размеров лишь отдельного элемента. Влияние таких факторов, как рассеяние тепла и необходимость получения внутренних межэлементных соединений, затрудняют реализацию указанной величины на практике.

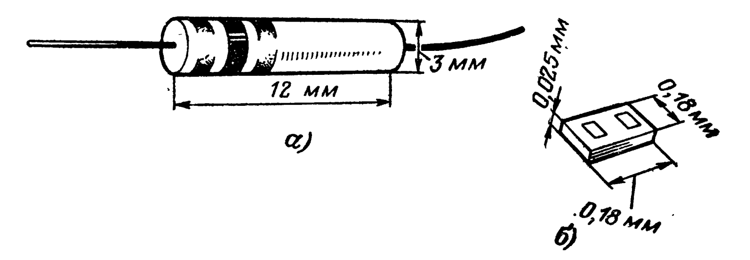
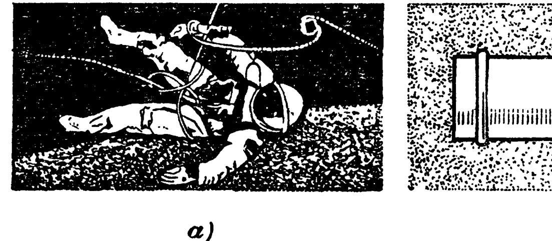


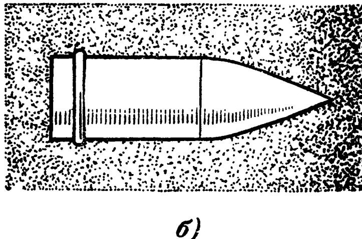
Рис. 1-2. Сравнение размеров резисторов одного номинала.
а — дискретный; *б* — интегральный.

Преимущества и недостатки. Характерной чертой микроэлектронных устройств являются малые размеры, поэтому микроэлектроника проникает прежде всего в те области, где наряду с высокими техни-

ческими характеристиками требуются минимальные объемы. Примерами таких областей могут быть космическая (рис. 1-3, *а*) и военная техника (рис. 1-3, *б*).

Другой областью, в которой применение микроэлектроники становится необходимым, являются быстродействующие логические





а) *б)*

Рис. 1-3. Примеры областей, в которых необходимо использование микроэлектроники.

а — электронное оборудование космонавта; *б* — управляемый снаряд.

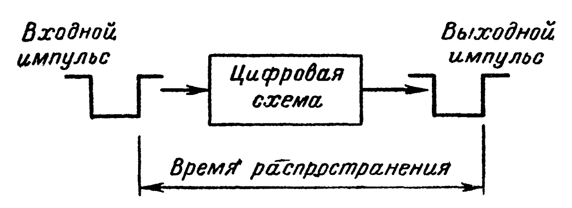


Рис. 1-4. Время распространения сигнала через цифровую схему.

элементы. При работе цифровых вычислительных машин необходимо передавать сигналы в форме электрических импульсов из одной части системы в другую. Время, затрачиваемое электрическим импульсом на прохождение через один элемент вычислительной машины, называется временем распространения (рис. 1-4). Современные вычислительные машины требуют для функционирования таких скоростей, когда время распространения измеряется единицами наносекунд. Наносекунда — такая малая величина, что даже распространяясь со скоростью света, равной 300 000 км/с, электрический сигнал за 1 нс проходит только 30 см. Современная электроника достигла такого уровня, когда уменьшение линейных размеров элементов диктуется необходимостью уменьшения времени распространения через систему.

ВОПРОСЫ

1. **Помимо линейных размеров плотность упаковки ограничивается .... и ....**
2. **Уменьшение .... радиоприемников возможно при использовании микроэлектронных элементов.**
3. **За одну наносекунду свет проходит расстояние, равное ....**

ОТВЕТЫ

1. Помимо линейных размеров плотность упаковки ограничивается **рассеянием тепла** и **внутренними межэлементными соединениями.**
2. Уменьшение **размеров** радиоприемников возможно при использовании микроэлектронных элементов.
3. За одну наносекунду свет проходит расстояние, равное **30 см.**

Главным недостатком микроминиатюрных устройств является высокая стоимость. Необходимость использования специальных корпусов и дорогостоящего технологического оборудования делают это неизбежным.

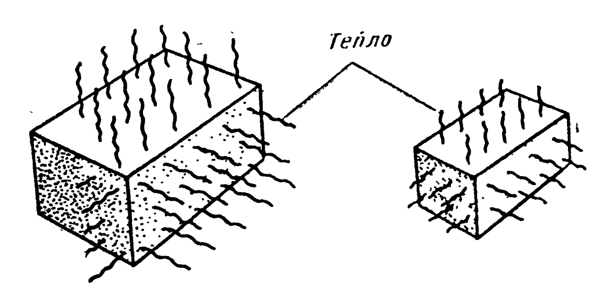


Рис. 1-5. Рассеяние тепла электронным блоком.

При работе электронного оборудования выделяется тепло, которое рассеивается в основном через поверхность устройства путем теплопроводности, конвекции или радиации (рис. 1-5). Если схема, выполняющая определенную функцию, уменьшается в размерах, то и поверхность, через которую происходит рассеяние тепла, также сокращается, в то время как рассеиваемая мощность остается прежней. Поэтому если не принять специальных мер, то температура системы может возрасти выше критической и надежность системы ухудшится. Следовательно, значение рассеиваемой мощности — одно из главных ограничений при выборе объема устройства.

1-2. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Наиболее существенные технологические достижения были сделаны в области ракетной и космической техники. Человек отправился на Луну не в громадном пушечном ядре, не имеющем связи с внешним миром, как в свое время описывал Жюль Верн. Современный космический аппарат связан с землей многими радиоканалами. Бортовые и наземные электронные системы позволяют решать сложные задачи (рис. 1-6). Связь включает не только взаимный контакт космонавтов, но и сбор всех данных от приборов, расположенных на корабле. Функции управления сводятся к обработке всей получаемой информации и к использованию ее для выработки ре-

шения о продолжении или изменении программы полета. Использование баллистических ракет для военных целей не требует аппаратуры для связи с землей. Запущенная ракета управляется внутренней памятью и специальной системой управления. Информация, которой снабжаются электронные системы, вводится до запуска, по-

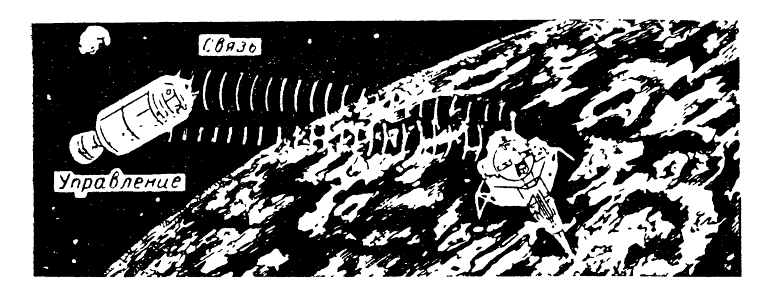


Рис. 1-6. Использование электроники в космических аппаратах.

этому эффективность ракеты в поражении цели полностью определяется надежностью этих систем.

ВОПРОСЫ

1. **Разработчик микроэлектронных устройств встречается с проблемой .... и ....**
2. **Электроника в управляемых космических аппаратах выполняет функции связи и управления.**

ОТВЕТЫ

1. Разработчик микроэлектронных устройств встречается с проблемой **стоимости и отвода тепла.**
2. Электроника в управляемых космических аппаратах выполняет функции **связи и управления.**

Эффективность космических исследований в значительной мере зависит от надежности электронных систем, которые находятся на борту космического корабля. Рисунок 1-7 иллюстрирует одну из основных проблем в этой области. Каждый полезный килограмм собственно космического аппарата требует многих сотен килограммов металлических конструкций первой и второй ступеней ракеты и горючего. Необходимость как можно эффективнее использовать каждый килограмм массы космического аппарата и послужила причиной того, что микроэлектроника нашла широкое применение в этой области, а высокая стоимость электронных схем компенсируется уменьшением массы электронных систем.

Надежность электронного оборудования ракет и космических кораблей должна быть существенно выше надежности промышленного оборудования. Для того чтобы микроэлектронные схемы мож-

но было использовать в военной и космической технике, они должны иметь лучшие характеристики, чем у обычных схем, и они в самом деле их имеют.

Промышленное использование микроэлектроники. В предыдущем разделе подчеркивалось, что высокая стоимость ограничивала использование достижений микроэлектроники прежде всего военной аппаратурой и космической техникой, где наряду с высокой надежностью имеют место жесткие ограничения в массе. Для промышленного оборудования эти требования не являются столь жесткими. Надежность современной цифровой вычислительной машины (ЦВМ), обеспечиваемая дискретными транзисторами, диодами, резисторами и т. п., вполне приемлема для гражданского применения. Наибольшие хлопоты связаны с механическими, а не электронными частями ЦВМ. Требования, предъявляемые к размеру и массе, также незначительны, так как большую часть объема и массы вычислительной машины занимает такое оборудование, как устройство для пробивания перфокарт, контрольные панели и т. п. По этой причине использование микроэлектроники в промышленном оборудовании отстает от военных и космических областей.

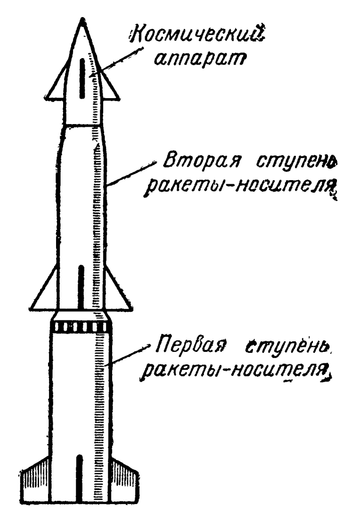


Рис. 1-7. Сравнение размеров ракеты-носителя и полезной нагрузки.

При изготовлении цифровых машин отдельные элементы соединяются прежде всего в простейшие схемы — логические элементы, из которых затем конструируются более сложные схемы: регистры, счетчики и элементы памяти. Соединение этих схем между собой и добавление устройств ввода и вывода образуют схему электронной вычислительной машины.

ВОПРОСЫ

1. **Допустимые размеры ракеты-носителя являются серьезным ограничением для . . . . электронного оборудования космического корабля.**
2. **Использование микроэлектронной техники приводит к уменьшению . . . . , ... и повышению . . . . электронного оборудования.**

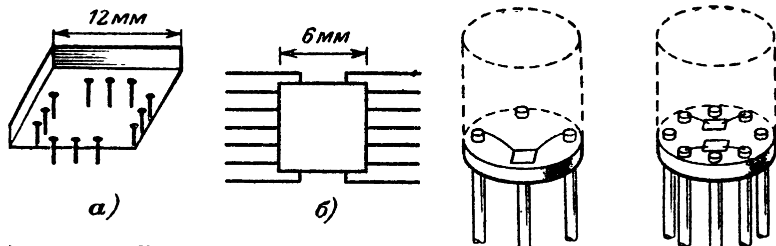
ОТВЕТЫ

1. Допустимые размеры ракеты-носителя являются серьезным ограничением для **массы** электронного оборудования космического корабля.

2. Использование микроэлектронной техники приводит к уменьшению размеров, массы и повышению надежности электронного оборудования.

Один из методов монтажа состоит в построении схем на небольших печатных платах, образующих отдельный модуль. Если число типов печатных плат может быть уменьшено путем стандартизации, то каждый отдельный модуль можно рассматривать как элемент.

Вследствие того что эти «суперэлементы» являются электронными эквивалентами совокупности множества простых элементов, та-



б) **Рис. 1-8. Микроэлектроника в цифровых вычислительных машинах.**

а — модуль фирмы IBM; *б* — плоский корпус фирмы RCA.

Рис. 1-9. Использование корпуса с многими выводами.

ких как транзисторы, диоды и резисторы, число различных деталей и необходимых испытаний при проектировании и изготовлении ЦВМ существенно сокращается. Использование стандартного корпуса для схемных модулей позволяет механизировать процесс выполнения межэлементных соединений и много других ручных операций, что уменьшает стоимость изготовления ЦВМ. Кроме того, выбор определенной стандартной схемы и стандартного корпуса, как основы модуля, удешевляет производство самого модуля, потому что для вычислительной машины требуется большое количество таких однотипных элементов. На рис. 1-8 показаны два стандартных микроэлектронных модуля, используемых в цифровых машинах. Фирма IBM в своей машине серии «360» очень широко использует «технологию монолитной логики» (ТМЛ), в которой пластинки транзисторов, диоды и тонкопленочные резисторы соединены в стандартный модуль (рис. 1-8, *а*). Вычислительная машина «Спектр 70» фирмы RCA выполнена на монолитных кремниевых схемах (рис. 1-8, *б*). В обоих случаях использование микроэлектроники при изготовлении стандартных схем приводит к уменьшению стоимости систем и повышению быстродействия вследствие сокращения времени распространения.

Один из способов, снижающих стоимость изготовления функциональных логических схем в микроэлектронике в случае использования для этих целей дискретных элементов, иллюстрируется на рис. 1-9. Стоимость корпуса является главной составляющей в полной стоимости транзистора. Поэтому при размещении двух транзисторных пластинок в корпус с многими выводами стоимость од-

ного транзистора может быть уменьшена примерно вдвое. Кроме того, опыт показывает, что в большинстве случаев причиной отказа работы транзистора являются дефекты корпуса. Поэтому уменьшение числа корпусов в системе приводит к повышению ее надежности. Указанное рассуждение справедливо, если стоимость корпуса с многими выводами и обычного корпуса одинакова. На самом деле это не так, но имеющееся отличие не столь значительно по сравнению с тем выигрышем, который получается при размещении нескольких схем в корпусе со многими выводами.

ВОПРОСЫ

1. Надежность современной вычислительной машины не ограничивается надежностью ее . . . . оборудования.

2. Простейшим элементом в цифровой вычислительной машине является «. . . . .».

3. Использование стандартных схем в стандартных корпусах уменьшает стоимость системы из-за упрощения операций, связанных с . . . ., выполнением . . . . и применением . . . . .

ОТВЕТЫ

1. Надежность современной вычислительной машины не ограничивается надежностью ее **электронного** оборудования.
2. Простейшим элементом в цифровой вычислительной машине является **«логический элемент»**
3. Использование стандартных схем в стандартных корпусах уменьшает стоимость системы из-за упрощения операций, связанных с **испытанием,** выполнением **межэлементных соединений** и применением **ручного труда.**

Эксплуатация микроэлектронного оборудования. Применение электроники в военной технике обеспечивает ей такие технические возможности, которые вряд ли могут быть достигнуты другими путями. Такими примерами являются связь, радиолокация, управление ракетами и средствами поражения летательных аппаратов с помощью вычислительных машин и т. п. По мере усложнения и увеличения числа функциональных операций, приводящих к увеличению элементов, надежность устройств падает. Многие сложные электронные системы не могут функционировать более ста часов непрерывной работы.

Эта проблема может быть решена несколькими способами. Очевидное решение заключается в повышении надежности отдельных элементов. Микроэлектроника способствует этому, уменьшая число корпусов на каждый элемент, выполняющий определенную функцию. Повышение надежности межэлементных соединений также необходимо для совершенствования электронных систем. Механизируя технологию выполнения межэлементных соединений, микроэлектроника приводит к уменьшению появления ошибок и в этой области. Однако даже при надежном соединении элементов, как показывает практика, возможно появление отказов из-за несовершенного обслуживания системы. Поэтому необходимо рассмотреть возможности ремонта электронных схем.

Предположим, что один из конденсаторов усилителя (рис. 1-10) оказался закороченным. Для наладки устройства, в которое входит

этот усилитель, должна быть выполнена следующая последовательность операций. Во-первых, необходимо найти вышедший из строя усилитель, затем проанализировать причину отказа путем тщательного исследования всей схемы. После чего вышедший из строя элемент удалить из цепи и заменить годным. Успех дела зависит от квалификации человека, исправляющего схему, и от имеющихся в распоряжении запасных частей. Обнаружение вышедшего из строя

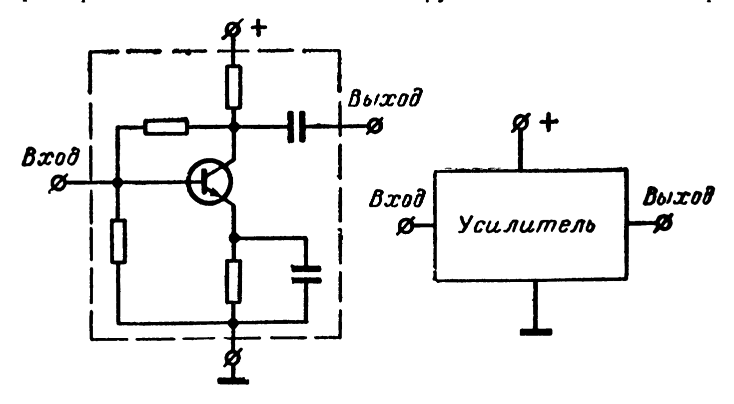


Рис. 1-10. Усилительный функциональный блок.

усилителя не столь сложно, так как простая проверка выходного напряжения обычно позволяет определить неисправность. Для того чтобы найти конкретную причину отказа, в нашем случае закороченный конденсатор, необходимо хорошо знать работу схемы. В любой системе имеется множество различных схем, поэтому для работы с электронным оборудованием требуются подготовленные специалисты. Удаление неисправного элемента из схемы возможно лишь ручным способом.

ВОПРОСЫ

1. **Основной недостаток сложных электронных схем — их плохая . . . .**
2. **Операции при ремонте электронного оборудования включают в себя . . . . дефекта, ... причины отказа и . . . . неисправного элемента.**

ОТВЕТЫ

1. Основной недостаток сложных электронных систем — их плохая **надежность**.
2. Операции при ремонте электронного оборудования включают в себя **обнаружение** дефекта, **анализ** причины отказа и **замену** неисправного элемента.

Проанализируем аналогичную ситуацию для случая системы, выполненной с помощью микроэлектронных средств. Предположим, что такая система включает большое количество однотипных цифро-

вых функциональных блоков, показанных на рис. 1-11. При поисках неисправности оператор теперь имеет дело с набором функциональных схем, а не отдельных элементов. Как и прежде, несложная проверка позволяет определить вышедший из строя блок. Однако после этого уже не требуется квалифицированного анализа. Неисправный блок просто вынимается или отпаивается обычными средствами, а на его место устанавливается аналогичный стандартный блок и система быстро возвращается в рабочее состояние. Конечно, в данном случае выбрасывается много годных элементов, так как неисправность может быть вызвана отказом лишь одного элемента внутри схемы. Однако если учесть, что стоимость корпуса является основной составляющей стоимости всей интегральной схемы, то уда-

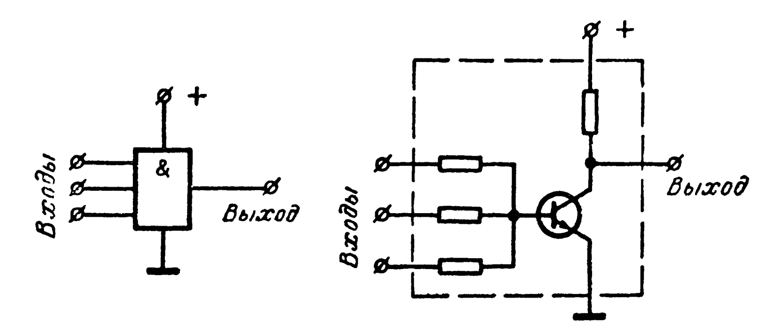


Рис. 1-11. Цифровой функциональный блок.

ление исправных элементов в одном корпусе вместе с единственным элементом, пришедшим в негодность, не наносит заметного ущерба. С другой стороны, отсутствие потребности в специальной квалификации обслуживающего персонала упрощает процесс подготовки кадров, а стандартизация заменяемых блоков упрощает проблему подборки необходимых запасных частей. Последние обстоятельства компенсируют высокую стоимость ремонта военного оборудования. Рисунок 1-12 иллюстрирует факторы, баланс которых необходим для получения высокой эффективности микроэлектронных схем при минимальной стоимости.

Расширение функциональных возможностей электронных устройств. Как следует из всего предыдущего обсуждения, использование микроэлектронных схем приводит к тому, что современное электронное оборудование становится лучше, дешевле, надежнее или обладает совокупностью этих качеств. Однако более эффективное использование микроэлектроники заключается в том, что открываются принципиально новые возможности для выполнения ряда электронных функций, которые до недавнего времени не имели практической реализации из-за высокой стоимости или низкой надежности.

Далее рассматриваются некоторые новые особенности, которые появляются при проектировании сложных электронных систем. В первом приближении мы можем считать сложность системы пропорциональной числу корпусов электронных элементов, входящих

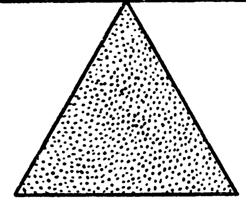


Рис. 1-12. Экономический баланс при использовании функциональных блоков.

в систему. Это оправдано тем, что число корпусов не только определяет количество требуемых элементов, но и характеризует сложность межэлементных соединений в системе.

ВОПРОС

Микроэлектроника упрощает ремонт оборудования, потому что использование функциональных модулей облегчает подготовку специалистов для .... причины отказа.

ОТВЕТ

Микроэлектроника упрощает ремонт оборудования, потому что использование функциональных модулей облегчает подготовку специалистов для **анализа** причины отказа.

Как видно из рис. 1-13, увеличение числа корпусов в системе приводит к увеличению ее стоимости и снижению надежности. Это означает, что даже при больших затратах на изготовление очень сложной системы (например, электронного запоминающего устройства с объемом памяти, эквивалентной головному мозгу) вероятность получения работоспособной системы практически равна нулю. В случае дискретных элементов один корпус соответствует одному элементу. Для микроэлектроники, когда в одном корпусе находится целая функциональная схема, возможно десятн-

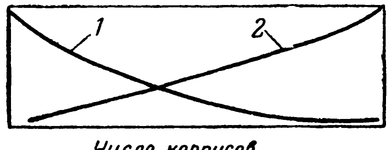


Рис. 1-13. Зависимость стоимости и надежности системы от числа корпусов.
1 — надежность системы; 2 — стоимость системы.

кратное повышение сложности при том же уровне надежности системы. Современные успехи в развитии технологии производства микросхем позволяют надеяться, что в будущем создание сложных функциональных систем средствами микроэлектроники станет дешевле, чем обычными способами. Поэтому на любом конкретном уровне требований к электрическим характеристикам системы и ее стоимости внедрение микроэлектроники будет увеличивать эффективность электронного оборудования. Возможно в будущем целесообразно изготовлять все цифровые вычислительные машины на основе одного типового корпуса для интегральных схем.

Микроэлектроника будет способствовать улучшению эффективности многих систем хотя бы потому, что с ней связаны меньшие геометрические размеры. Ранее мы уже обсуждали важность размеров элементов для времени распространения сигнала в цифровых системах. В усилительных схемах уменьшение длины межэлементных соединений приводит к уменьшению паразитных индуктивностей выводов, а малый размер элементов сводит к минимуму паразитные емкости, что повышает частотные свойства усилителя при малых мощностях рассеяния.

ВОПРОСЫ

1. Развитие микроэлектроники было вызвано требованием сокращения габаритов военной и космической аппаратуры.

а) Микроминиатюризация позволяет выполнять электронные функции, заиимая минимальный . . . .

б) Микроэлектрониое оборудование впервые было использовано в военной и космической аппаратуре для экономии объема и увеличения . . . .

2. Несмотря на высокую первоначальную стоимость, быстрое развитие и совершенствование технологии позволили использовать достижение микроэлектроники в промышленной и бытовой аппаратуре так же эффективно, как в военной и космической областях.

а) Микроэлектроника, используемая в промышленном оборудовании, позволяет улучшить . . . . и снизить . . . . систем.

б) Высокая стоимость ремонта микроэлектронных функциональных блоков компенсируется экономией в . . . . технического персонала и простотой подборки . . . . . .

ОТВЕТЫ

1. а) Микроминиатюризация позволяет выполнять электронные функции, занимая минимальный **объем.**

   б) Микроэлектронное оборудование впервые было использовано в военной и космической аппаратуре для экономии объема и увеличения **надежности.**

2. а) Микроэлектроника, используемая в промышленном оборудовании, позволяет улучшить **характеристики** и снизить **стоимость** систем.

   б) Высокая стоимость ремонта микроэлектронных функциональных блоков компенсируется экономией в **подготовке** технического персонала и простотой подборки **запасных частей.**

Глава вторая

ПРЕИМУЩЕСТВА МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

С чем Вы познакомитесь в этой главе. Использование принципов микроэлектроники для проектирования и изготовления электронных систем открывает перед конструктором новые широкие возможности. Некоторые из них рассмотрены в этой главе. Кроме того, читатель познакомится с влиянием микроэлектроники на такие показатели систем, как надежность, стоимость, размеры и рассеиваемая мощность.

2-1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Развитие микроэлектроники как одного из ведущих направлений разработки электронных систем началось фактически с изобретения транзистора в 1948 г. В то время существовало немного областей, где требования к размерам систем были достаточно жестки. Это радиоуправляемые взрыватели в военной области, слуховые аппараты и портативные («карманные») приемники. Требования этих систем привели к разработке специальных субминиатюрных вакуумных радиоламп, катушек индуктивности, резисторов, конденсаторов и наушников, изготовление которых ранее было затруднено. Но даже с этими малыми элементами лишь некоторые области применения были успешно миниатюризованы. Одна из причин этого заключалась в высокой стоимости и незначительной надежности субминиатюрных ламп; главная же причина состояла в проблеме теплоотвода.

Потребление мощности. При использовании вакуумных радиоламп выделяется тепло. Для того чтобы оксидный катод мог эффективно эмиттировать электроны, он должен быть нагрет примерно до 700 °С. Для малых приемных радиоламп это требует от одного до двух ватт мощности. На рис. 2-1 приведена схема лампового усилителя и его транзисторного аналога. Если считать, что ток лампы в рабочей точке составляет 3 мА, то высоковольтный источник напряжения должен отдавать около 0,6 Вт для обеспечения нормальной работы усилителя. В транзисторном же варианте значение этой мощности составляет лишь 0,036 Вт. Кроме того, 0,6 Вт, потребляемые лампой, составляют лишь часть общей мощности, так как по крайней мере удвоенная мощность требуется для подогрева катода. Таким образом, общая потребляемая лампой мощность достаточно велика и эффективность лампы с этой точки зрения мала. Но если даже считать источник энергии неограниченным, то плотная установка ламп в устройствах представляет собой трудную задачу. Как только отдельные лампы будут размещены вблизи друг друга, эффективность отвода выделяемого тепла резко уменьшится, в результате чего температура устройства возрастет. Такие элементы как резисторы и конденсаторы весьма чувствительны к температуре окружающей среды, причем при повышенной температуре не только изменяются их номиналы по отношению к первоначальным значениям, но и ухудшаются такие параметры, как надежность и стабильность.

Появление транзисторов позволило уменьшить потребляемую мощность за счет отсутствия подогреваемого катода и сделало вы-

полнимой проблему плотной упаковки. В миниатюризации оборудования был сделан огромный скачок. Размеры таких малых систем, как радиоприемники, стали определяться главным образом входными и выходными элементами — антеннами и громкоговорителями. Для больших систем новые возможности в получении плотного монтажа стимулировали развитие дополнительной миниатюризации резисторов, конденсаторов и трансформаторов с целью получения габаритов этих элементов, близких к габаритам транзистора.

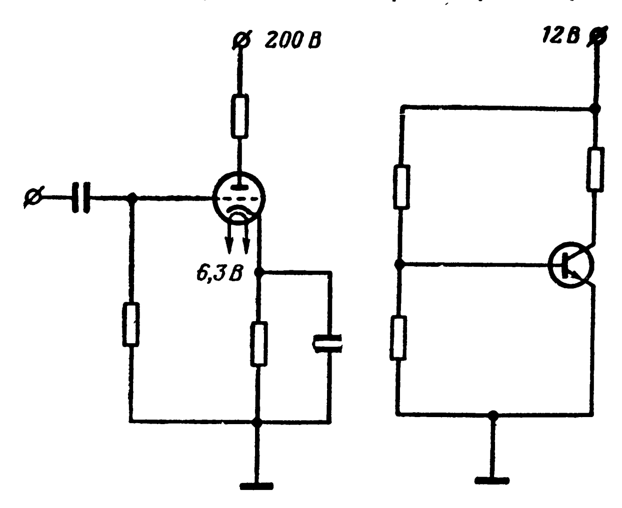


Рис. 2-1. Усилители на радиолампе и транзисторе.

Успехи электронной промышленности в миниатюризации дискретных элементов хорошо подтверждаются широким ассортиментом миниатюрного промышленного, бытового и военного оборудования. «Карманные» приемники стали сейчас обычным явлением, высококачественные слуховые аппараты монтируются в очки, запонки и ювелирные украшения. Современная микроэлектроника вторгается в традиционную область точной механики — производство часов — путем разработки надежных электронных часовых механизмов. Военная техника использовала успехи в уменьшении размеров электронных элементов для создания комплексных электронных систем обнаружения и поражения цели, которые могут располагаться в относительно небольших объемах авиационных ракет. Новые технические возможности позволили бортовой электронике стать более сложной без ущерба в надежности.

ВОПРОСЫ

1. Уменьшение геометрических размеров микросхем приводит к уменьшению паразитных . . . . и . . . .
2. В схемах на электронных лампах основная часть потребляемой мощности используется для подогрева . . . . до 700 °С.

3. Плотная упаковка мощных электронных элементов приводит к увеличению температуры всего устройства, что вызывает . . . . параметров элементов и уменьшение их надежности.

ОТВЕТЫ

1. Уменьшение геометрических размеров микросхем приводит к уменьшению паразитных **индуктивностей** и емкостей.
2. В схемах на электронных лампах основная часть потребляемой мощности используется для подогрева катода до 700 °С.
3. Плотная упаковка мощных электронных элементов приводит к увеличению температуры всего устройства, что вызывает **изменение** параметров элементов и уменьшение их надежности

Объем и масса, необходимые для выполнения одной функции. На рис. 2-2 показан поперечный разрез корпуса обычного кремниевого транзистора с обозначением основных размеров. Собственно

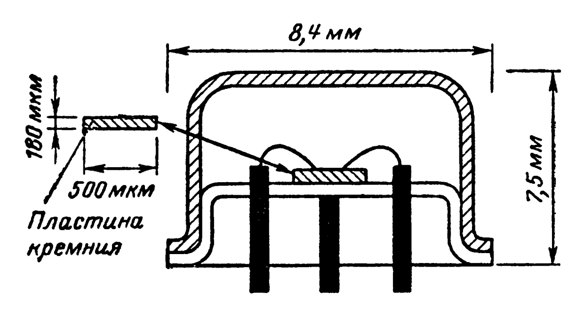


Рис. 2-2. Использование объема в транзисторном корпусе.

транзистор — это небольшая пластинка кремния внутри корпуса со стороной 500 и толщиной 180 мкм. Транзистор занимает менее десятой доли процента от всего объема корпуса. Однако прежде чем признать использование объема неэффективным, следует рассмотреть некоторые «неэлектронные» функции, выполняемые корпусом. Наиболее экономичным способом соединения транзисторов в электронную систему является распайка их на печатной плате. Между проводниками на печатной плате должно быть определенное расстояние для исключения короткого замыкания в процессе пайки. Корпус, показанный на рис. 2-2, позволяет осуществлять соединение к проводникам на печатной плате, минимальное расстояние между которыми составляет приблизительно 7 мм. В этом и заключается одна из важнейших функций корпуса — присоединение транзистора к печатной плате при заданных геометрических размерах межэлементных соединений.

Другая функция корпуса заключается в защите кристалла кремния от влияния окружающей среды. Верхний колпачок корпуса приваривается к нижнему фланцу для обеспечения надежнойермети-

зации. Работоспособность электронной лампы зависит от сохранения вакуума. Полупроводниковые приборы не требуют для своей работы вакуума и обычно герметизируются в атмосфере какого-либо инертного газа, например азота. Плотная герметизация предохраняет прибор в течение последующей эксплуатации от проникновения на кристалл транзистора влаги и других потенциально вредных загрязнений. Третья функция транзисторного корпуса состоит в улучшении отвода тепла за счет конвекционного обмена с окружающей средой. Перечисленные выше функции корпуса не являются необходимыми для работы собственно транзисторного кристалла, а обеспечивают лишь выполнение определенных требований при соединении отдельных транзисторов в систему. Это и позволяет использовать транзистор как часть электронного устройства. Поэтому любая попытка повысить эффективность заполнения объема полупроводникового устройства путем изменения или удаления его корпуса должна обеспечить сначала выполнение указанных функций каким-либо другим путем.

ВОПРОСЫ

1. **Кристалл кремния в транзисторном корпусе занимает менее чем . . . . общего объема.**
5. **Некоторые функции корпуса заключаются в защите кристалла от . . . . , обеспечении . . . . и улучшении . . . .**

ОТВЕТЫ

2. Кристалл кремния в транзисторном корпусе занимает менее чем **одну десятую процента** общего объема.
3. Некоторые функции корпуса заключаются в защите кристалла от **влияния внешней среды,** обеспечении **межэлементных соединений** и улучшении **отвода тепла.**

В модуле фирмы IBM (рис. 2-3) это достигается рациональным расположением элементов, что позволяет получить значительный выигрыш в уменьшении объема и массы. В этом модуле полупроводниковый прибор покрыт тонкой пленкой стекла, обеспечивающей

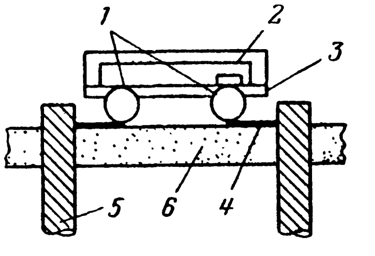


Рис. 2-3. Технология монтажа полупроводниковых пластинок, разработанная фирмой IBM.

1 — шаровые контакты; *2* — полупроводник; *3* — стекло; *4* — печатный проводник; *5* — медные выводы; *6* — керамика.

герметичную защиту от внешней среды. Соединительные элементы проходят через стекло, образуя сварные «шаровые» контакты. Перевернутый кристалл приваривается к печатной плате со стандартной разметкой на керамической подложке. Выводы проходят через кера-

мику, позволяя получить соединения с другими частями электронного устройства.

Другой путь улучшения функциональной эффективности с точки зрения объема и массы заключается в использовании отдельного корпуса, подобного корпусу обычного транзистора, сразу для нескольких элементов. Например, цифровая схема, изображенная на рис. 2-4, может быть размещена на одной или нескольких монолитных пластинках внутри корпуса с восемью выводами, имеющего такие же размеры, как и корпус на рис. 2-2. При этом может потребоваться лишь увеличение длины внешних выводов, а все остальные

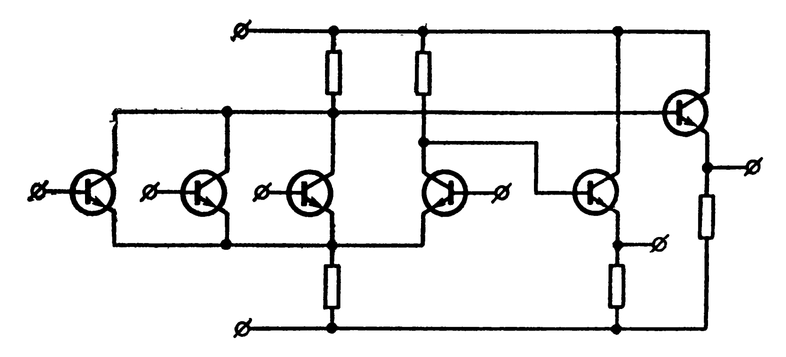


Рис. 2-4. Простейшая интегральная схема.

функции корпуса остаются неизменными. Таким образом, интегральная технология и является тем способом, который позволяет уменьшить объем и массу, приходящиеся на одну функцию схемы, путем размещения возможно большего количества элементов в одном стандартном корпусе.

Повышение эффективности производства. Существует большое количество областей применения, в которых требуемые электрические и геометрические параметры могут быть получены лишь при использовании микроэлектронных схем. Однако эти области не могут характеризовать всех потенциальных возможностей микроэлектроники. Будущее микроэлектроники будет зависеть от способности микросхем обеспечивать выполнение определенных функций в малом стандартном корпусе со стоимостью, не превышающей стоимость аналогичного по своим функциям устройства, выполненного на обычных элементах. Эта цель становится реальной, по мере того как стандартизация корпусов, автоматизация ручного труда, совершенствования технологии сборки будут снижать стоимость и повышать эффективность производства микросхем.

ВОПРОСЫ

Модуль фирмы IBM обеспечивает защиту полупроводниковых приборов от влияния внешней среды с помощью . . . .

2. **Интегральные схемы позволяют уменьшить объем и массу электронного оборудования путем размещения возможно большего количества функциональных элементов внутри . . . .**
3. **Основные возможности микроэлектроники могут быть реализованы в областях, где требования к . . . . и . . . . параметрам диктуются минимальными физическими размерами.**

ОТВЕТЫ

1. Модуль фирмы IBM обеспечивает защиту полупроводниковых приборов от влияния внешней среды с помощью **стекла.**
2. Интегральные схемы позволяют уменьшить объем и массу электронного оборудования путем размещения возможно большего количества функциональных элементов внутри **стандартного корпуса.**
3. Основные возможности микроэлектроники могут быть реализованы в областях, где требования к **электрическим и геометрическим** параметрам диктуются минимальными физическими размерами.

На рис. 2-5 показано расположение элементов на плате для сравнительно простой цифровой схемы. Сборка данной платы относительно сложна, так как должна выполняться ручным соединением

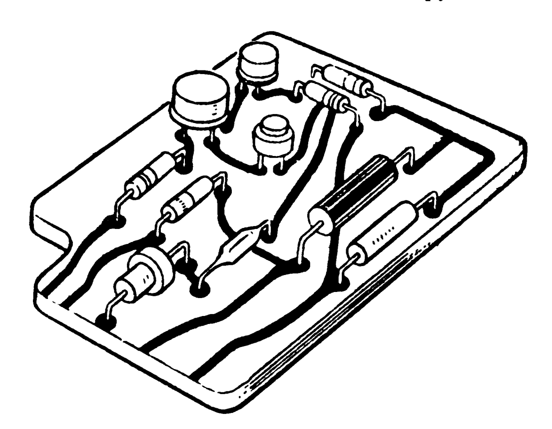


Рис. 2-5. Размещение дискретной схемы на плате.

разнообразных элементов, имеющих разные размеры, форму и число выводов. Каждый из этих элементов приобретается отдельно, поэтому перед сборкой необходимо разработать индивидуальную проверку их качества.

На рис. 2-6 показана разметка типовой печатной платы для цифровой системы с использованием интегральных схем. Тот факт, что все корпуса имеют одинаковые размеры, обеспечивает существенную экономию в сборке и использовании ручного труда.

Каждый корпус на плате рис. 2-6 является функциональным эквивалентом всей предыдущей платы (см. рис. 2-5). Совокупность же всех этих корпусов выполняет функцию десятичного счетчика. Реализация такого уровня сложности на плате означает существенное уменьшение общего числа плат для выполнения заданной электронной функции. Тем самым использование микросхем приводит к экономии в использовании ручного труда за счет простого уменьшения числа отдельных частей системы.

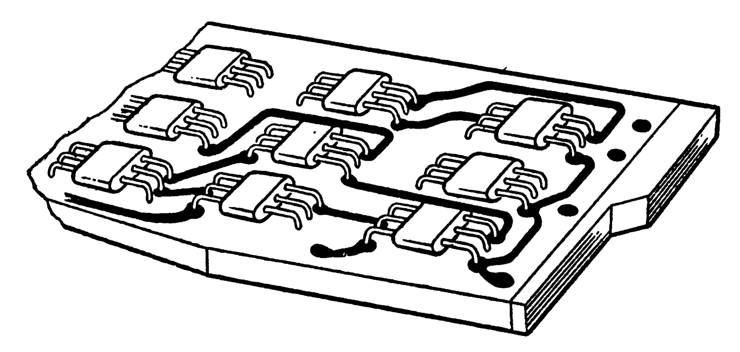


Рис. 2-6. Размещение интегральных схем на плате.

Конечно, стоимость интегральной схемы в корпусе выше стоимости отдельного транзистора, резистора или другого дискретного элемента. Однако если рассматривать стоимость, приходящуюся на одну функцию схемы, то оказывается, что для интегральных схем при изготовлении их большими партиями она будет ниже, чем для схем, выполненных на дискретных элементах. Это различие, очевидно, сохранится и в будущем. Однако стоимость микроэлектронных схем конкурирует не тольке со стоимостью дискретных элементов. Скорее это конкуренция в функциональном объединении элементов. Наиболее ярко оно проявляется в области цифровых вычислительных машин. Большинство современных машин проектируются с расчетом на использование более экономичных стандартных интегральных схем.

ВОПРОСЫ

1. **Сборка схем на дискретных элементах является достаточно трудоемким процессом, так как . . . . размеры и формы элементов требуют использования ручного труда.**
2. **Использование интегральных схем на печатных платах позволяет стандартизировать процесс . . . . и сократить долю . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Сборка схем на дискретных элементах является достаточно трудоемким процессом, так как **различные** размеры и формы элементов требуют использования ручного труда.
2. Использование интегральных схем на печатных платах позволяет стандартизировать процесс **проверки** и сократить долю **ручного труда**.

2-2. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Интегральные схемы относятся к классу электронных устройств, которые выполняют такие электронные функции, которые обычно выполняются путем использования комбинации многих дискретных элементов. На рис. 2-7 показаны основные элементы, используемые при проектировании и создании электронных систем. Описание каждого из них сводится к анализу специфических электрических характеристик, которые определяются структурными и химическими осо-

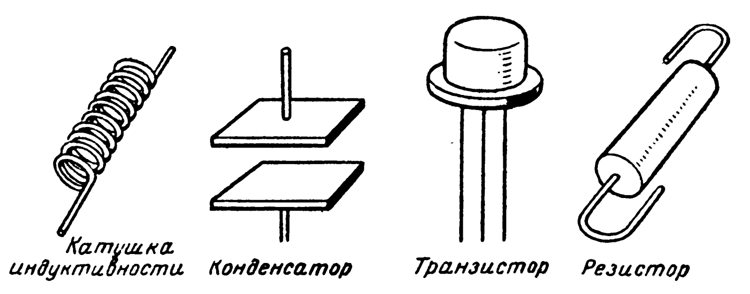


Рис. 2-7. Элементы, необходимые для выполнения электронных функций.

бенностями элементов. Катушка индуктивности представляет собой катушку провода с сердечником или без него. Свойство, названное идуктивностью, основывается на теории магнетизма и заключается в том, что ток в катушке имеет тенденцию сохраняться постоянным. Конденсатор характеризуется способностью сохранять электрический заряд. Резистор изготовлен из материала, позволяющего ограничивать поток электрических зарядов. При использовании резистора в схеме ток будет пропорционален приложенному напряжению. Транзистор — полупроводниковый прибор, сопротивление которого может изменяться в соответствии с приложенным внешним током или напряжением. Вакуумная радиолампа обладает теми же свойствами, что и транзистор.

Описанные выше свойства элеметов могут в какой-то степени даже не интересовать проектировщика электронных систем. В первую очередь его интересует возможность реализации определенной функции, например, воспроизведение звука с грампластинки или получение светового сигнала в случае ошибки в счете на ЦВМ. Таким образом, первый шаг, который должен сделать проектировщик электронной системы, заключается в определении характеристик системы, необходимых для реализации заданной функции.

ВОПРОСЫ

1. **Интегральная схема — законченное устройство, которое может заменить несколько элементов, обычно требующихся для выполнения определенной** . . . .
2. **Свойство тока, протекающего через катушку, оставаться постоянным называется** . . . .

3. Элемент, **изменяющий** сопротивление под действием напряжения, может быть получен путем использования . . . . **или** . . . .

ОТВЕТЫ

1. Интегральная схема — законченное устройство, которое может заменить несколько элементов, обычно требующихся для выполнения определенной **электронной функции**.
2. Свойство тока, протекающего через катушку, оставаться постоянным называется **индуктивностью**.
3. Элемент, изменяющий сопротивление под действием напряжения, может быть получен путем использования **транзистора** или **электронной лампы**.

Например, в случае усилителя для воспроизведения звука с пластинки требуемая функция может заключаться в получении тока 100 мА в катушке громкоговорителя на каждый милливольт сигнала от звукоснимателя. Следуя обозначениям рис. 2-8, связь выходного

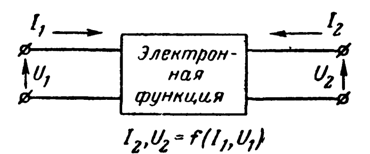


Рис. 2-8. Представление схемы в виде четырехполюсника.

тока и входного напряжения для этого случая можно выразить следующим образом:

$$I_2 = \frac{0,1}{0,001} U_1.$$

После того как функция системы определена, необходимо выбрать соответствующую комбинацию элементов для выполнения требуемой функции. Результат всей этой работы показан на рис. 2-9, откуда видно, как реализована функция усилителя напряжения соединением основных элементов в схему.

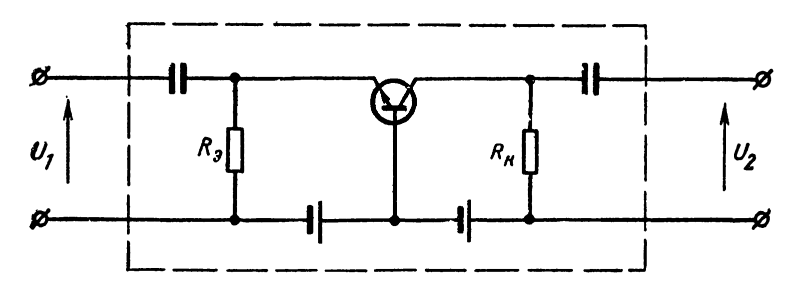


Рис. 2-9. Усилитель напряжения.

Разработчика не интересует, каким способом реализована требуемая функция. Ему необходимо знать напряжение питания, входное и выходное сопротивления, максимальную рабочую частоту. Очевидно, что сборка электронных элементов в функциональный блок производится самим изготовителем интегральных схем. В этом заключается различие между интегральными схемами и схемами на дискретных элементах.

Способы изготовления интегральной схемы могут быть самыми различными. Наиболее простой состоит в сборке обычных дискретных элементов, необходимых для выполнения данной функции, таким образом, чтобы вся схема помещалась, например, в пластиковом корпусе, а наружу выходили лишь необходимые выводы для связи с другими каскадами. Самый совершенный способ заключается в реализации целой электронной функции внутри одного кристалла, как это делается, например, при изготовлении пьезоэлектрического фильтра. В большинстве интегральных схем резисторы, транзисторы и другие элементы выполняют прежние функции, но их изготовление и свойства существенно отличаются от соответствующих дискретных аналогов. Например, резисторы в схеме могут изготовляться на том же самом кристалле кремния, где располагаются транзисторы, или наноситься путем напыления на изолятор внутри того же корпуса.

Выбор того или иного способа изготовления интегральной схемы определяется квалификацией изготовителя и характером предъявляемых к схеме электрических требований.

Изготовитель элементов должен постоянно совершенствовать прикладные области, связанные с физикой, химией, механикой с тем, чтобы применять новые, более эффективные и экономичные решения для изготовления необходимого функционального блока.

ВОПРОСЫ

1. **Самый совершенный способ создания интегральных схем включает изготовление таких функциональных блоков, как . . . . фильтры.**
2. **В большинстве интегральных схем резисторы, транзисторы и другие элементы выполняют прежние . . . . , но способы их . . . . могут быть принципиально новыми.**

ОТВЕТЫ

1. Самый совершенный способ создания интегральных схем включает изготовление таких функциональных блоков, как пьезоэлектрические фильтры.
2. В большинстве интегральных схем резисторы, транзисторы и другие элементы выполняют прежние функции, но способы их изготовления могут быть принципиально новыми.

Гибридные схемы. Термин гибридная схема относится к электронной системе, которая изготовляется сборкой комбинации, состоящей из интегральных схем и дискретных элементов. Так как любое электронное устройство требует для своей работы выполнения определенных электронных функций, а интегральные схемы создаются для реализации этих функций внутри одного корпуса, то теоре-

тически любая система может быть выполнена на одних интегральных схемах, или, говоря образно, может быть создана одна «суперинтегральная» схема. Однако с практической точки зрения техника изготовления электронных систем основывается не на том, что выполнимо теоретически, а что выгодно экономически. «Суперинтегральные» схемы, способные выполнять целые системные функции, будут несомненно сложны и иметь ограниченное применение. Более простой путь изготовления устройств на интегральных схемах состоит в использовании этих схем для разработки функциональных блоков с последующим соединением блоков между собой способами печатного монтажа.

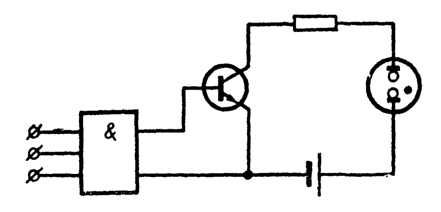


Рис. 2-10. Управление индикаторной неоновой лампой с помощью цифрового логического элемента.

Другой аспект «гибридного» пути микроминиатюризации состоит в построении систем на комбинации интегральных и дискретных элементов. Большинство систем нуждается лишь в небольшом количестве специализированных схем, где используются уникальные элементы.

Вследствие технологической сложности и ограниченности областей применения уникальные схемы целесообразнее выполнять обычными способами дискретной электроники. На рис. 2-10 показан пример такого специфического требования в цифровой схеме. Для зажигания неоновой лампы требуется относительно высокое напряжение и выходной транзистор, используемый для управления лампой, должен иметь напряжение пробоя выше 100 В. Технологические процессы для выполнения этого условия несовместимы с теми, которые требуются для изготовления высококачественного цифрового логического элемента в одном монокристалле. Поэтому использование в схеме дискретного, достаточно дешевого высоковольтного транзистора является более выгодным.

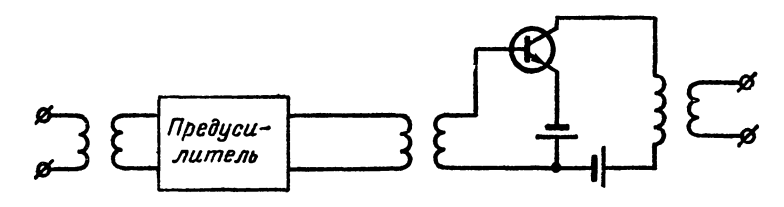


Рис. 2-11. Интегральный предусилитель и мощный выходной каскад.

Рисунок 2-11 иллюстрирует использование гибридного способа при изготовлении выходного усилителя. Если требуется достаточно большая выходная мощность, то выходной каскад должен быть заключен в корпус с малым тепловым сопротивлением для обеспечения эффективного отвода тепла. Такой корпус обычно гораздо дороже корпуса маломощного интегрального предусилителя. Кроме того,

очень часто возникают требования уменьшения или стабилизации температуры предусилительного каскада. Поэтому в выходном каскаде целесообразно использование отдельного мощного транзистора с хорошим отводом тепла.

ВОПРОС

В том случае, когда к отдельным частям системы предъявляются специфические требования, такие как высокое напряжение или большая мощность, для конструирования системы целесообразно использовать способы . . . . технологии.

ОТВЕТ

В том случае, когда к отдельным частям системы предъявляются специфические требования, такие как высокое напряжение или большая мощность, для конструирования системы целесообразно использовать способы **гибридной** технологии.

Источники питания. Использование интегральных схем в принципе не предъявляет каких-либо новых требований к источникам питания по сравнению со схемами на дискретных элементах. Действительно, если интегральная схема имеет те же номиналы элементов,

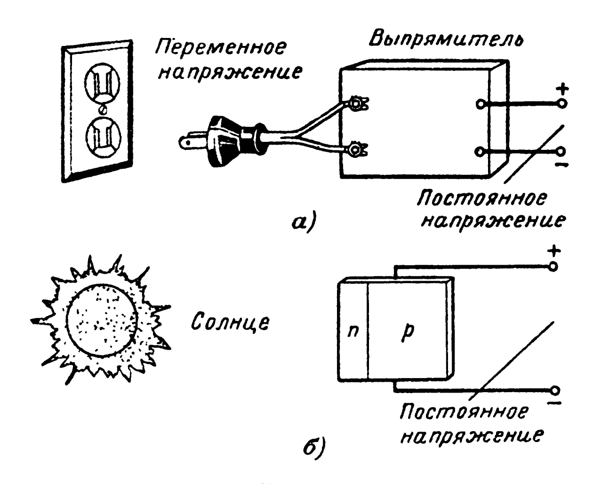


Рис. 2-12. Источники питания.

а — обычный; *б* — солнечный элемент.

что и ее дискретный аналог, то требования к мощности источника питания остаются прежними. На рис. 2-12 показаны некоторые типы источников питания. Интегральные схемы впервые были применены в ракетной и космической технике, где использовался их наиболее важный показатель — возможность получения высокой плотности

монтажа. Последнее привело к проблеме, связанной с теплоотводом, и поэтому в этих областях основное внимание было обращено на проектирование маломощных схем. Надежность была также важнейшим параметром первых интегральных схем. Так как схемы, рассеивающие меньшую мощность, меньше и нагреваются, то вероятность выхода из строя элементов значительно снижается. Поэтому снижение мощности означает также повышение надежности работы прибора.

Мощность источников питания в бортовой аппаратуре с интегральными схемами обычно невелика. Кроме того, полупроводниковые приборы, составляющие основу интегральных схем, работают при малых напряжениях. Поэтому в качестве источников питания в бортовых системах с успехом могут быть использованы солнечные элементы (рис. 2-12, *б*).

Однако когда требуется высокая скорость переключения в логических схемах или хорошие частотные свойства в усилительных цепях, то использование интегральных схем может привести к увеличению требуемой мощности источников питания. Примерами могут быть кремниевые монолитные интегральные схемы. Их недостатком являются большие паразитные емкости транзисторов и резисторов. Для того чтобы уменьшить влияние этих емкостей, схемы должны работать при больших токах, что требует относительно большой мощности источников питания В системах, использующих быстродействующие схемы, некоторое увеличение мощности компенсируется улучшением других характеристик благодаря применению интегральных схем.

ВОПРОСЫ

1. **Интегральные схемы для бортовой аппаратуры рассчитывались на малую рассеиваемую мощность, так как это позволяло получить высокую .... и хорошую ....**
2. **Увеличение мощности некоторых интегральных схем, несмотря на больший разброс номиналов элементов и увеличение паразитных ...., позволяет улучшить их характеристики по сравнению с аналогичными схемами на дискретных элементах.**

ОТВЕТЫ

1. Интегральные схемы для бортовой аппаратуры рассчитывались на малую рассеиваемую мощность, так как это позволяло получить высокую **плотность монтажа** и хорошую **надежность.**
2. Увеличение мощности некоторых интегральных схем, несмотря на больший разброс номиналов элементов и увеличение паразитных **емкостей,** позволяет улучшить их характеристики по сравнению с аналогичными схемами на дискретных элементах.

Совместимость интегральных схем со схемами на дискретных элементах. В большинстве случаев интегральные схемы функционально совместимы со схемами на дискретных элементах, имеющимися в той же системе.

Однако проблема совместимости может появиться, например, в цифровых схемах. Для того чтобы уменьшить потребляемую мощность или увеличить быстродействие, уровень сигналов в арифметическом устройстве вычислительной машины может быть ограничен узким диапазоном, не превышающим 0,8 В. Этот диапазон может не соответствовать требованиям мощных оконечных устройств, поэто-

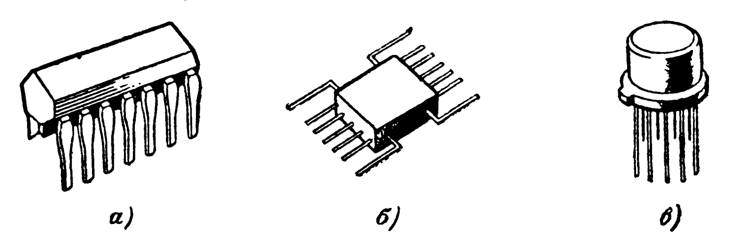


Рис. 2-13. Корпуса интегральных схем.

а — с двумя рядами выводов; *б* — плоский; *в* — ТО-5.

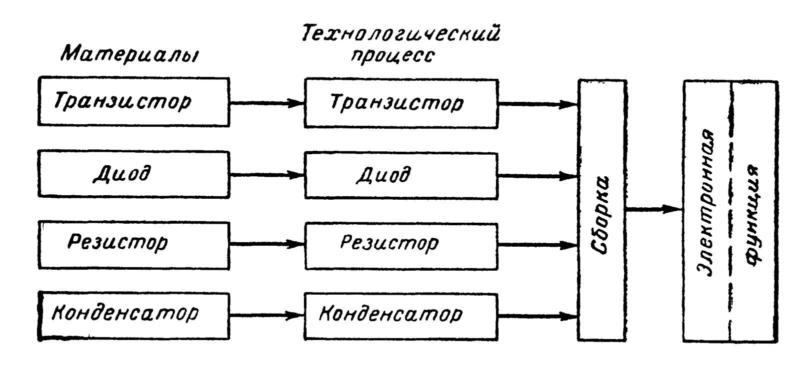


Рис. 2-14. Этапы разработки схемы из дискретных элементов.

му необходимо создание специальных «буферных» схем для обеспечения нормального функционирования всей системы.

На рис. 2-13 показаны некоторые типы имеющихся в настоящее время корпусов. Корпуса позволяют соединять отдельные приборы в системы, используя пайку или сварку. Эти корпуса были разработаны для интегральных схем. Таким образом, способы соединения интегральных схем в системы совместимы с теми, которые уже разработаны для ручного соединения дискретных элементов.

На рис. 2-14 показаны основные этапы разработки схемы из дискретных элементов. Для изготовления резисторов используются уголь, металлические пленки и провод. Материалом для конденсаторов служат алюминий, слюда, керамика и окись тантала. Для транзисторов требуются германий и кремний, а для изготовления диодов, кроме того, могут использоваться селен и закись меди. Для каждого материала, так же как и для отдельного элемента, необходима раз-

работка специального технологического процесса. Улучшение технологии и эффективности производства несомненно будут снижать стоимость продукции, приближая ее к стоимости материала и непосредственно затраченной рабочей силы. Этого же следует ожидать и для интегральных схем. Основные этапы производства кремниевой монолитной схемы показаны на рис. 2-15. Количество необходимых материалов в этом случае существенно уменьшается. За исключением корпуса, требуются только кремний, алюминий, бор и фосфор. Кроме того, для герметизации всей интегральной схемы нужен лишь один корпус.

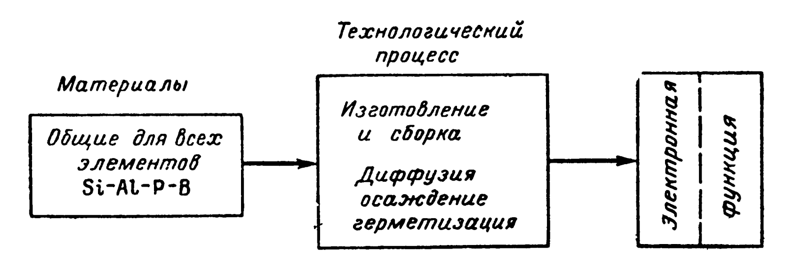


Рис. 2-15. Этапы изготовления интегральной схемы.

Выше подчеркивалось, что использование интегральных схем дает изготовителям систем реальные преимущества, если их стоимость будет соизмерима со стоимостью обычных схем на дискретных элементах. Поэтому целесообразно сделать обзор некоторых факторов, которые определяют стоимость интегральных схем, и сравнить их с факторами, влияющими на стоимость элементов, используемых в обычных схемах.

Стоимость элементов включает:

а) стоимость затрат на разработку требуемой технологии;

б) стоимость материала;

в) стоимость рабочей силы;

г) стоимость комплектующих изделий;

д) накладные расходы, связанные с процессом контроля качества элементов и технологических операций;

е) стоимость оборудования.

Производство интегральных схем, которое содержит в себе огромные потенциальные возможности для уменьшения стоимости, основывается на изготовлении всей схемы в одном кристалле кремния. Для того чтобы оценить масштаб этих возможностей, сравним затраты при производстве интегральных схем с соответствующими затратами при изготовлении обычных схем.

Изготовление элементов и их сборка при производстве интегральных схем осуществляются одновременно путем проведения операций диффузии и осаждения. Сотни схем, содержащие тысячи элементов, изготовляются одновременно. Операции же, связанные с герметизацией, приблизительно в 2 раза сложнее, чем при герметизации отдельного транзистора. Но так как любая схема содержит большое количество транзисторов, то затраты, приходящиеся на один транзистор, будут существенно меньше для интегральных схем.

Процессы могут сравниваться на основе шести факторов, приведенных выше. В настоящее время вследствие новизны производства затраты на разработку технологии интегральных схем много выше, чем для дискретных элементов. Но по мере накопления знаний и стабилизации производства это различие будет стираться. Интегральные элементы содержат существенно меньше материалов по сравнению с дискретными. Основная стоимость материала связана с изготовлением корпуса. Так как обычные схемы требуют несколько корпусов на выполнение одной схемной функции, то интегральные схемы, заключенные в единственный корпус, имеют несомненное преимущество с этой точки зрения. Если предположить, что степень механизации и уровень производства одинаковы, то нет причин считать, что возможно значительное различие между стоимостью непосредственно затрачиваемой рабочей силы для интегрального и дискретного путей микроминиатюризации.

Однако стоимость комплектующих изделий, накладные расходы и стоимость оборудования всегда существенно выше для процессов, имеющих дело со многими материалами, по сравнению с расходами по контролю одного процесса и использованию небольшого количества исходных материалов. Преимущества в последних трех областях дают предпочтение производству интегральных схем.

ВОПРОСЫ

1. **Проблема стоимости, являясь одной из важнейших проблем интегральных схем, определяется затратами на ....**
2. **Три других фактора стоимости, в которых проявляются преимущества интегральных схем, включают стоимость ...., ... и стоимость ....**

ОТВЕТЫ

1. Проблема стоимости, являясь одной из важнейших проблем интегральных схем, определяется затратами на **разработку технологии.**
2. Три других фактора стоимости, в которых проявляются преимущества интегральных схем, включают стоимость **комплектующих изделий, накладные расходы** и стоимость **оборудования.**

2-3. НАДЕЖНОСТЬ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ

Малые размеры, получаемые при использовании микроэлектронной техники, позволяют собирать сложные электронные системы в небольшом объеме. Однако до тех пор, пока эти системы не будут надежно работать в течение заданного периода времени, все преимущества плотной упаковки сводятся к нулю. Конструкторы систем используют микроэлектронику не для того, чтобы реализовать заданную функцию в меньшем объеме, а для того, чтобы в аналогичном объеме получить выполнение большего количества функций. Поэтому чтобы получить необходимую надежность устройства, микроэлектронная технология должна обеспечить гораздо большую надежность входящих в нее элементов.

Надежность. Использование полупроводниковых приборов в электронной технике дало ей главное преимущество перед ламповыми системами. Все оксидные катоды так или иначе выходят из строя вследствие эмиссии электронов с их поверхности. Полупроводниковые же приборы не имеют подогреваемого катода. Действительно, в настоящее время неизвестны физические причины, которые могли бы привести правильно изготовленный и правильно эксплуатируемый транзистор к выходу из строя в течение срока службы оборудования. Конечно, и в электронном устройстве, использующем полупроводники, могут быть дефекты, хотя процент отказов в нем гораздо меньше той величины, которая встречается в устройстве на электронных лампах.

Главные причины отказов систем заключаются в следующем:

а) ошибки в технологии;

б) дефекты корпуса;

в) повреждение соединений между элементами.

Категория технологических дефектов перекрывает большинство возможных видов отказов при эксплуатации. Толщина окисла на приборе может быть неравномерной, неправильное конструирование приводит к плохой герметизации, при небрежной эксплуатации устройства встречаются поломки полупроводниковых пластинок, посторонние примеси могут быть вплавлены и оставлены в корпусе и т. п. По мере совершенствования технологии изготовления транзистора эти дефекты встречаются реже, но они все же иногда имеют место. На рис. 2-16 показаны наиболее важные функции корпуса с точки

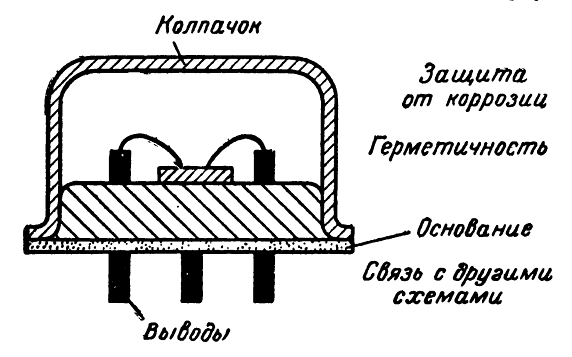


Рис. 2-16. Функции корпуса транзистора в обеспечении надежности.

зрения обеспечения надежной работы полупроводникового прибора.

Герметичность — защита активной части прибора от проникновения окружающей среды. Несмотря на то что кремниевые приборы менее чувствительны к влиянию внешней среды, чем германиевые, они все же будут выходить из строя во влажной атмосфере.

Обеспечение связи с другими схемами — размер выводов и их металлическое покрытие выбираются таким образом, чтобы обеспечить надежное соединение элементов существующими способами монтажа.

Защита от коррозии — корпус проектируется на такие типы покрытий, которые могли бы обеспечить нормальное функционирование

прибора в сложных условиях, как, например, условия солевого раствора.

ВОПРОСЫ

1. **В кремниевых интегральных схемах процессы изготовления элементов и их соединения проводятся . . . .**
2. **Затраты на материалы при производстве интегральных схем меньше, чем в случае обычных схем, потому что при этом требуется меньшее количество . . . . на выполнение одной функции.**

ОТВЕТЫ

1. В кремниевых интегральных схемах процессы изготовления элементов и их соединения проводятся **одновременно.**
2. Затраты на материалы при производстве интегральных схем меньше, чем в случае обычных схем, потому что при этом требуется меньшее количество **корпусов** на выполнение одной функции.

Много отказов в системах связано с нарушением герметизации корпуса. Третья причина — повреждение соединений между элементами — одна из наиболее часто встречающихся. Она заключается

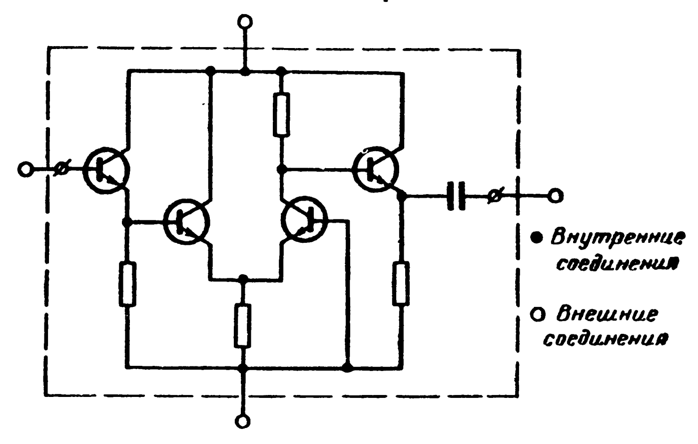


Рис. 2-17. Сравнение количества внутренних и внешних соединений.

в появлении так называемых «холоднопаяных соединений» между выводами элементов и печатной схемой на плате.

Оценим действие всех перечисленных факторов на надежность микроэлектронных схем.

Ошибки в технологии — производственные ошибки, вероятно, никогда не будут ликвидированы. Однако можно ожидать, что простые процессы с небольшим числом используемых материалов будут сопровождаться появлением меньшего числа дефектов по сравнению со сложными процессами, требующими разнообразного исходного материала.

Дефекты корпуса — если даже считать, что корпуса микросхем не имеют принципиальных преимуществ по надежности по сравнению с обычными транзисторными корпусами, то, учитывая возможность создания микроэлектронных систем при меньшем количестве корпусов, можно сделать вывод, что влияние этого рода отказов в микроэлектронике будет существенно ниже.

Повреждение соединений между элементами — использование микроэлектроники, особенно интегральных схем, уменьшает количество соединений, которые должны быть выполнены на печатной пла-

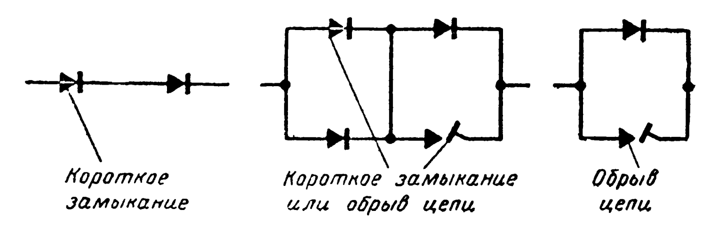


Рис. 2-18. Использование резервирования для повышения надежности.

те. Рисунок 2-17 показывает необходимое число внутренних и внешних соединений. Если внутренние соединения могут быть сделаны более надежным способом, чем простая пайка, то надежность системы, использующей интегральные схемы, будет увеличиваться.

Так как неисправные элементы могут появляться в любой системе, то желательно еще на этапе проектирования системы предусмотреть средства для повышения ее надежности. Одним из таких средств является резервирование, которое заключается в использовании дополнительных элементов на случай, если некоторые из них выйдут из строя. Рисунок 2-18 иллюстрирует этот способ иа примере используемого в схеме диода. Возможные виды отказов сводятся к тому, что в диоде будет иметь место короткое замыкание или обрыв цепи. Из рисунка следует, что появление этих дефектов не влияет на правильное функционирование схемы при резервировании.

ВОПРОСЫ

1. **Нарушение эмиссии в электронной лампе приводит к ее . . . .**
2. **Правильно изготовленный полупроводниковый прибор имеет . . . . срок службы.**
3. **Причины, из-за которых некоторые полупроводниковые приборы приводят к отказам в работе электронных систем, заключаются в существовании . . . . и повреждении . . . .**
4. **Поломка транзисторного кристалла является примером . . . . дефекта.**
5. **Типичный пример нарушения соединений между элементами состоит в появлении « . . . . ».**
6. **Использование микроэлектронных схем приводит к уменьшению влияния технологических дефектов на надежность систем, потому что при их изготовлении требуется . . . . технологических операций.**

ОТВЕТЫ

1. Нарушение эмиссии в электронной лампе приводит к ее **отказу.**
2. Правильно изготовленный полупроводниковый прибор имеет **неограниченный** срок службы.
3. Причины, из-за которых некоторые полупроводниковые приборы приводят к отказам в работе электронных систем, заключаются в существовании **ошибок в технологии, дефектов корпуса** и повреждении **соединений между элементами.**
4. Поломка транзисторного кристалла является примером **технологического** дефекта.
5. Типичный пример нарушения соединений между элементами состоит в появлении **«холоднопаяных соединений»**.
6. Использование микроэлектронных схем приводит к уменьшению влияния технологических дефектов на надежность систем, потому что при их изготовлении требуется **меньшее число** технологических операций.

Считается, что одновременно может отказать лишь один диод. Это оправдано, так как даже дискретные элементы имеют очень редкие случаи отказов. Введение резервирования приводит к дополнительному увеличению числа элементов и соответствующих межэле-



Рис. 2-19. Ремонт электронного устройства.

ментных соединений. Поэтому до тех пор, пока не проведено детальное исследование всех факторов, влияющих на надежность, резервирование, повышая надежность устройств, одновременно может ухудшить характеристики системы.

Эксплуатация. Малые размеры микроэлектронных систем делают почти невозможным их обслуживание без использования специального борудования. На рис. 2-19 показаны все необходимые этапы при ремонте электронного устройства Существование дефекта становится очевидным, когда нарушается нормальное функционирование системы. После этого требуется обнаружить повреждение и определить характер необходимых работ. Как правило, ремонт связан с заменой неисправных элементов. Для дискретных элементов определение места и анализ повреждения часто представляют собой достаточно

трудную задачу, потому что дефект может быть связан, например, с утечкой в конденсаторе и только совершенно очевидные «симптомы» могут показать, что данный элемент вышел из строя. В случае использования интегральных схем каскад заменяется целиком. При этом замена осуществляется относительно просто, потому что стандартизация корпусов, что обычно имеет место в микроэлектронных устройствах, позволяет стандартизировать необходимый инструмент и операции по ремонту.

ВОПРОСЫ

1. **Микроэлектроника позволяет уменьшить влияние надежности корпусов на надежность систем, так как в микроэлектронном оборудовании используется . . . . корпусов.**
2. **Надежность соединений между элементами может быть улучшена путем использования интегральных схем, так как при этом . . . . число необходимых связей на печатной плате.**

ОТВЕТЫ

1. Микроэлектроника позволяет уменьшить влияние надежности корпусов на надежность систем, так как в микроэлектронном оборудовании используется **меньшее количество** корпусов.
2. Надежность соединений между элементами может быть улучшена путем использования интегральных схем, так как при этом **уменьшается** число необходимых связей на печатной плате.

Потенциально низкая стоимость микроэлектронных схем делает экономически выгодной замену отдельных каскадов из-за какой-либо одной неисправности. Рисунок 2-20 иллюстрирует некоторые такие

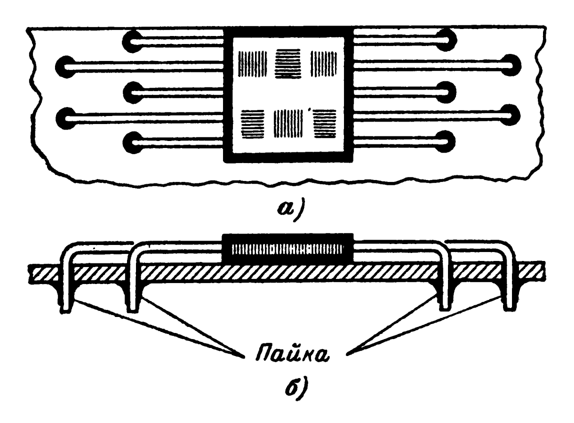


Рис. 2-20. Присоединение плоского корпуса к печатной плате.

а — вид сверху; *б* — поперечное сечение.

возможности применительно к интегральной схеме на печатной плате. Доступ ко всем выводам схемы облегчает процесс обнаружения неисправности. Плоский корпус легко может быть срезан, а его выводы удалены с поверхности печатной платы без какого-либо специального инструмента, после чего на печатную плату припаивается новая микросхема с таким же расположением выводов.

Средняя наработка на отказ. Надежность устройства или системы является важным эксплуатационным параметром. По этой причине очень важно разработать и установить количественные критерии определения надежности так, чтобы можно было сравнивать надежность различных систем. На рис. 2-21 показано изменение интенсивности отказов некоторой системы во времени. Сплошная кривая соответствует экспериментальным данным, а пунктирная представляет собой теоретически ожидаемый результат. Теоретическая линия предполагает постоянство интенсивности отказов, т. е. на каждую тысячу часов работы устройства строго определенное число отказов. Эта интенсивность может быть выражена числом. Наклон пунктирной линии соответствует среднему значению интенсивности отказов. Экспериментальная кривая имеет более сложную форму. Вначале наблюдается очень большое число неисправностей, связанных, как правило, с производственными дефектами, которые не были выявлены при первоначальной проверке, но проявляются под влиянием непрерывной эксплуатации. После удаления этих дефектов в течение довольно длительного времени наблюдается небольшое число отказов до тех пор, пока отдельные узлы системы не начинают изнашиваться, израсходовав свой ресурс. Если нет причин для старения, то в системе могут быть достигнуты очень малые значения интенсивности отказов в течение весьма длительного времени. Несмотря на то что интенсивность отказов непостоянна, общепринято пренебрегать начальными ошибками в области малых времен или избавляться от них путем специальной «тренировки» оборудования и использовать наклон кривой отказов после этой точки как меру надежности. Очень часто применяется понятие «средняя наработка на отказ». Эта величина обратно пропорциональна интенсивности отказов. Значение «средней наработки на отказ» используется для количественного сравнения надежности различных систем. Рассмотрим пример, в котором параметр «средняя наработка на отказ» может быть использован для теоретической оценки надежности системы. Считая ее для одной схемы равной 100 000 ч определим ожидаемое число отказов в системе, состоящей из 500 таких схем, в течение 1000 ч:

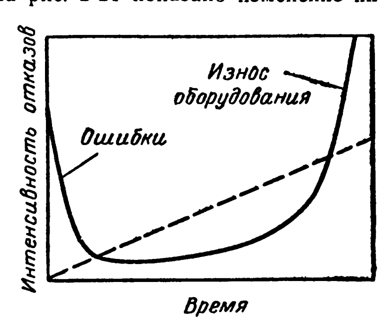


Рис. 2-21. Изменение интенсивности отказов во времени.

$$\text{число отказов} = \frac{[\text{число схем}]\cdot[\text{время}]}{[\text{средняя наработка на отказ}]} = \frac{500\cdot 1000}{100\,000} = 5.$$

ВОПРОСЫ

1. **Число отказов, связанных с повреждением элементов, может быть уменьшено на этапе проектирования системы путем . . . .**
2. **Ремонт микроэлектронного оборудования облегчается благодаря использованию функциональных блоков и стандартизации . . . . и . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Число отказов, связанных с повреждением элементов, может быть уменьшено на этапе проектирования системы путем **резервирования.**
2. Ремонт микроэлектронного оборудования облегчается благодаря использованию функциональных блоков и стандартизации **корпусов и операций сборки.**

2-4. БУДУЩЕЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Различная стоимость интегральных схем и дискретных элементов, используемых в промышленных цифровых системах, является главным фактором в конкуренции между этими двумя способами изготовления электронного оборудования. В этой главе были рассмотрены преимущества, которые получает конструктор систем при использовании интегральных схем. В заключение следует обратить внимание разработчика микроэлектронных устройств на ряд других важных обстоятельств.

В ближайшем будущем не ожидается быстрого уменьшения стоимости интегральных схем, скорее увеличится их использование в различных областях для получения выигрыша в управлении, гибкости и надежности.

С технической точки зрения вполне возможно, что в будущем цветные телевизоры будут изготовляться без использования интегральных схем. Скорее всего микроминиатюризация не затронет звуковой и видеоканалы, УПЧ, тракт цветного изображения, УКВ и высокочастотные блоки настройки. Стоимость цветных телевизоров будет уменьшаться скорее за счет других технических усовершенствований, чем из-за использования интегральных схем.

Несомненно, что применение микросхем приведет к улучшению характеристик магнитофонов, радиоприемников, электронных систем зажигания автомобилей, систем контроля в машиностроительной, тяжелой промышленности и т. п.

Сфера автомобилестроения широко открыта для использования дешевых полупроводниковых приборов и интегральных схем. В этой области предстоит еще решить много задач в проектировании новых и совершенствовании старых систем.

В будущем увеличится объем выпуска твердотельных приборов и интегральных схем. Проникновение интегральных схем на широкий рынок пойдет по пути разработки экономичной технологии их изготовления, что позволит в комплексе с приборами на дискретных элементах создавать дешевые микроминиатюрные изделия.

ВОПРОСЫ

1. **Использование микроэлектроники приводит к увеличению надежности и облегчению ремонта электронного оборудования. Это достигается уменьшением числа корпусов и сокращением числа необходимых технологических процессов при изготовлении интегральных схем.**

   а) **Интегральные схемы обеспечивают выполнение определенной функции в . . . .**

   б) **Первой крупной областью использования интегральных схем были . . . .**

   в) **Основные причины сбоев в работе систем объясняются технологическими . . . ., дефектами . . . ., и повреждениями . . . . между элементами.**

2. **Малые размеры микроэлектронных систем делают невозможным их обслуживание без использования специального оборудования.**

   а) **. . . . . необходим для обнаружения повреждения и определения характера ремонтных работ.**

   б) **Потенциально низкая стоимость микроэлектронных схем делает экономически выгодной . . . . дефектных каскадов.**

   в) **. . . . . устройства или системы является важным эксплуатационным параметром.**

ОТВЕТЫ

1. *а*) Интегральные схемы обеспечивают выполнение определенной функции в **одном корпусе.**

   б) Первой крупной областью использования интегральных схем были **цифровые вычислительные машины.**

   в) Основные причины сбоев в работе систем объясняются технологическими **дефектами**, дефектами **корпуса** и повреждениями **соединений** между элементами.

2. *а*) **Анализ** необходим для обнаружения повреждения и определения характера ремонтных работ.

   б) Потенциально низкая стоимость микроэлектронных схем делает экономически выгодной **замену** дефектных каскадов.

   в) **Надежность** устройства или системы является важным эксплуатационным параметром.

Глава третья

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

С чем Вы познакомитесь в этой главе. В этой главе Вы познакомитесь с некоторыми соображениями технического и экономического характера, которые необходимо учитывать при использовании микроэлектронных способов для микроминиатюризации электронных систем. Рассмотрена номенклатура микросхем и описаны такие

вопросы, как интегральные схемы, техника тонких пленок, плотность упаковки и т. п. Обсуждены различные виды технических приемов, известные в настоящее время. Эти приемы включают применение дискретных элементов и использование возможностей, связанных с микросхемами и новыми электронными приборами.

Эффективное использование микроэлектронной технологии требует внимания как к конструкции всей системы, так и к ее отдельным составным частям. Рассмотрены некоторые проблемы контроля технологических процессов при микроэлектронном производстве.

Проведен обзор некоторых факторов, которые необходимо учитывать в микроэлектронике. К ним относятся проблемы рассеяния тепла при плотном монтаже, влияние микроэлектроники на надежность систем, новые критерии выбора мощности источников питания.

3-1. ТЕРМИНОЛОГИЯ

Интегральные схемы. Термин и н т е г р а л ь н а я с х е м а относится к электронному устройству, способному выполнять функцию, для реализации которой обычно требуется соединение нескольких отдельных элементов, таких как транзисторы, резисторы и катушки индуктивности. Характерной чертой интегральной схемы является то, что каждый элемент теряет свои индивидуальные функции. Интегральная схема рассматривается только как «функциональный блок».

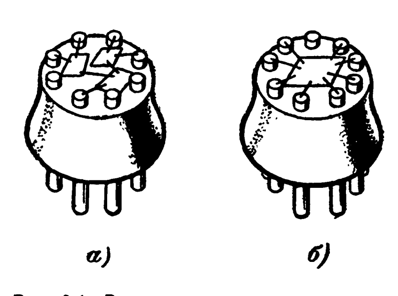


Рис. 3-1. Варианты интегральных схем.
а — гибридный; *б* — монолитный.

Кремниевая диффузионная или гибридная схема, представляющая собой аналог совокупности миниатюрных дискретных элементов, собранных в отдельный корпус, действительно является вполне самостоятельным функциональным элементом. Гибридный и монолитный варианты интегральных схем показаны на рис. 3-1.

Тонкопленочные интегральные схемы. В последние годы была разработана совершенная технология, использующая технику вакуумного испарения для изготовления резистивных и емкостных слоев на поверхности диэлектрика. Подробнее этот процесс будет описан в гл. 4. Подбирая соответствующую форму и расположение тонких пленок, можно изготовить такие элементы, как резисторы и конденсаторы. Для этой цели используются материалы: нихром, тантал, золото и ферриты. Если схемная функция может быть реализована только резистивными и емкостными элементами, то тонкопленочная технология, обеспечивая соединение этих элементов между собой, позволяет создать всю интегральную схему на одной подложке. Двойной Т-образный фильтр является примером такой схемной функции. Тонкопленочные резисторы и конденсаторы имеют лучшие параметры по сравнению с соответствующими элементами в полупро-

водниковых интегральных схемах. Преимущества тонкопленочных элементов — меньшие допуски, более широкий диапазон номиналов, относительно высокая температурная стабильность,

Модуль. М о д у л ь — отдельная схема в корпусе. В электронном оборудовании модуль обычно выполняет самостоятельную функцию, подобную логическому элементу в вычислительной машине или усилителю в системе связи. Как правило, модуль герметизируется в корпус правильной формы в виде куба или прямоугольника (рис. 3-2).

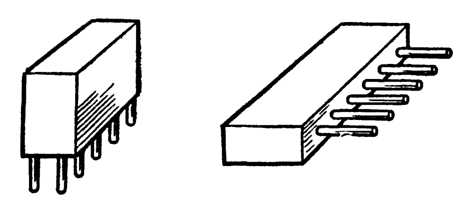


Рис. 3-2. Схемные модули.

Правильная форма модуля может быть получена путем облицовки пластиком схемы, собранной из элементов стандартного профиля, так как это делается при изготовлении микромодуля, или заключением отдельной схемы в стандартный корпус. Соединение модулей в системе может выполняться различными способами.

ВОПРОСЫ

1. **Элементы в интегральных схемах теряют свои .... дискретных элементов.**
2. **Тонкопленочная технология используется для получения .... и .... слоев на поверхности диэлектрика.**
3. **Тонкопленочные резисторы по сравнению с полупроводниковыми резисторами имеют меньшие ...., более широкий диапазон ...., лучшую ....**
4. **Если при конструировании аппаратуры используют модули, то отдельные схемы помещаются в корпуса .... формы.**

ОТВЕТЫ

1. Элементы в интегральных схемах теряют свои **функциональные свойства** дискретных элементов.
2. Тонкопленочная технология используется для получения **резистивных** и **емкостиых** слоев на поверхности диэлектрика.
3. Тонкопленочные резисторы по сравнению с полупроводниковыми резисторами имеют меньшие **допуски**, более широкий диапазон **номиналов**, лучшую **температурную стабильность.**
4. Если при конструировании аппаратуры используются модули, то отдельные схемы помещаются в корпуса **правильной** формы.

Способы соединения модулей. Модули могут соединяться пайкой, сваркой или с помощью штепсельных разъемов. Системы, собираемые из однотипных составных частей, позволяют унифицировать технику сборки и использовать для этой цели стандартный инструмент. Это в конечном счете удешевляет процесс выполнения соединений, делает их более надежными.

Подложка. Подложка обеспечивает механическое крепление элементов схемы и играет определенную роль в процессе выполнения соединений между элементами. Одной из простейших подложек является печатная плата (рис. 3-3), представляющая собой диэлектрик с нанесенным на него «узором» проводников для соединения элементов схемы. Отверстия в плате позволяют вставлять выводы таких элементов, как транзисторы, резисторы, трансформаторы, конденсаторы и т. п., а прочный материал платы обеспечивает механическое крепление больших и малых деталей. Для выполнения соединений на плате могут использоваться сварка или пайка.

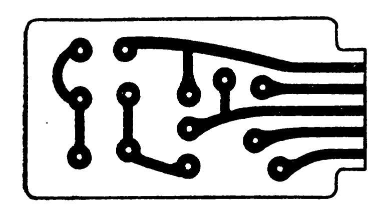


Рис. 3-3. Печатная плата.

Материал подложки, используемый для изготовления тонкопленочных схем, должен удовлетворять ряду механических и химических требований. Толщина пленок, осаждаемых на подложку, составляет примерно одну миллионную долю миллиметра. Поэтому чтобы обеспечить однородность пленки и хорошее сцепление, поверхность подложки должна иметь высокую степень чистоты. Так как тонкопленочная технология включает нагрев в вакууме, то следует обращать внимание на тепловое расширение подложки и ее способность выделять газ в вакууме. Обычно в качестве материала для подложек используется стекло, высококачественная керамика и в специальных случаях — пластинки полупроводника, покрытого слоем окиси.

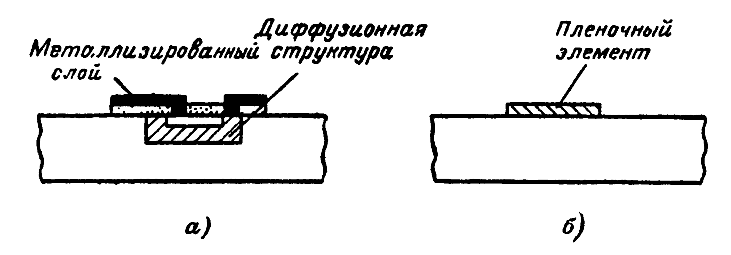


Рис. 3-4. «Активная» и «пассивная» подложки.

а — полупроводник («активная» подложка); *б* — диэлектрик («пассивная» подложка).

Свойство подложек, описанное выше, может быть определено как «пассивное», потому что подложка выполняет роль шасси для элементов схемы. В случае полупроводниковых интегральных схем

материал подложки — кремний — используется для изготовления элементов схемы. Когда материал подложки служит для изготовления таких элементов, как транзисторы и диоды, то мы имеем дело с «активными» подложками (рис. 3-4).

ВОПРОСЫ

1. **Модули могут быть соединены между собой ...., или с помощью ....**
2. **Модульная система состоит из однотипных элементов, позволяющих использовать стандартный инструмент и унифицировать операции .... модулей.**
3. **Механическое крепление элементов схемы обеспечивается ....**
4. **В качестве подложки для тонкопленочных элементов обычно используется .... или высококачественная ....**
5. **Материал «активных» подложек может быть использован для изготовления .... и ....**

ОТВЕТЫ

1. Модули могут быть соединены между собой **пайкой, сваркой** или с помощью **штепсельных разъемов.**
2. Модульная система состоит из однотипных элементов, позволяющих использовать стандартный инструмент и унифицировать операции **соединения** модулей.
3. Механическое крепление элементов схемы обеспечивается **подложкой.**
4. В качестве подложки для тонкопленочных элементов обычно используется **стекло** или высококачественная **керамика.**
5. Материал «активных» подложек может быть использован для изготовления **транзисторов** и **диодов.**

Полупроводниковые интегральные схемы. Совершенствование кремниевой планарной технологии позволило изготовлять на одной полупроводниковой подложке не только транзисторы и диоды, но и резисторы и конденсаторы. Соединение таких элементов и представляет собой полупроводниковую интегральную схему (рис. 3-5).

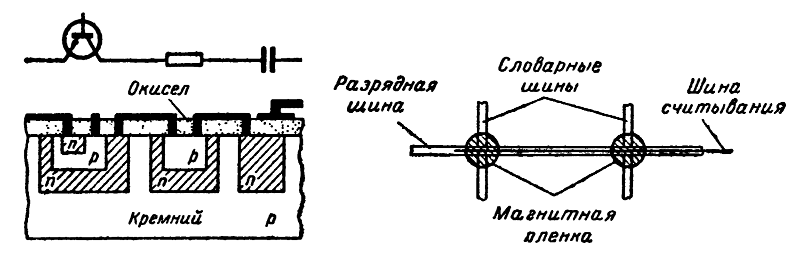


Рис. 3-5. Полупроводниковая интегральная схема.

Рис. 3-6. Магнитный элемент памяти

То обстоятельство, что все элементы полупроводниковой интегральной схемы могут быть изготовлены и соединены одновременно, представляет большие потенциальные возможности для получения низкой стоимости производства.

Магнитные интегральные схемы. Магнитные интегральные схемы представляют группу соединенных между собой магнитных элементов на общей подложке, способных выполнять такие специфические функции, как запоминание (рис. 3-6). Методы тонкопленочной технологии распространяются и на изготовление магнитных интегральных схем. Материал, осаждаемый на подложку, в этом случае должен обладать магнитными свойствами. Используя вакуумное испарение, магнитный материал, например сплав никель—железо, может быть нанесен на различные участки подложки. Проводники около этих участков могут использоваться для намагничивания и размагничивания магнитных областей, т. е. для записи информации. Дополнительные проводники служат для считывания информации или определения степени намагничения. Так как степень намагничения может быть изменена и определена, можно использовать магнитные интегральные схемы для хранения информации по аналогии с ферритовыми кольцами в цифровых вычислительных машинах. Использование магнитных интегральных схем в качестве запоминающих элементов имеет потенциальные возможности для уменьшения размеров и улучшения быстродействия систем памяти вычислительных машин.

ВОПРОСЫ

1. **Полупроводниковые интегральные схемы изготовляются методом кремниевой . . . . технологии.**
2. **Резисторы и конденсаторы полупроводниковых интегральных схем . . . . по характеристикам своим дискретным аналогам.**
3. **Потенциально низкая стоимость полупроводниковых интегральных схем связана с тем, что при их изготовлении все элементы и соединения между ними выполняются . . . .**
4. **Магнитные интегральные схемы являются результатом расширения возможностей . . . . технологии.**
5. **Магнитные тонкие пленки используются для изготовления быстродействующей . . . . в вычислительных машинах.**

ОТВЕТЫ

1. Полупроводниковые интегральные схемы изготовляются методом кремниевой **планарной** технологии.
2. Резисторы и конденсаторы полупроводниковых интегральных схем **уступают** по характеристикам своим дискретным аналогам.
3. Потенциально низкая стоимость полупроводников интегральных схем связана с тем, что при их изготовлении все элементы и соединения между ними выполняются **одновременно.**
4. Магнитные интегральные схемы являются результатом расширения возможностей **тонкопленочной** технологии.
5. Магнитные тонкие пленки используются для изготовления быстродействующей **памяти** в вычислительных машинах.

Криотрон. Этот уникальный вид магнитной интегральной схемы основывается на явлении сверхпроводимости (нулевого сопротивления) некоторых материалов при температуре, близкой к абсолютному нулю (—273°С). Этот элемент (рис. 3-7) может выполнять логические функции или служить в качестве запоминающей ячейки.

Гибридные интегральные схемы. Термин — гибридные интегральные схемы относится к такому классу интегральных схем, которые изготавливаются комбинацией нескольких технологических способов. Например, отдельные транзисторные пластинки могут быть соединены с тонкопленочными резисторами, конденсаторами и даже миниатюрными индуктивностями в общем корпусе путем использования обычных монтажных проводников. Преимущество гибридных схем заключается в том, что их элементы перед сборкой могут быть подобраны согласно требуемой спецификации. Это облегчает конструирование схем с высокими показателями. Использование общего корпуса для всех элементов схемы приводит к экономии объема устройства и увеличению надежности системы. Недостатки этого способа изготовления микросхем связаны с трудностями и дороговизной проверки отдельных компонентов — пластинок и уменьшением надежности, присущим способу «последовательного» выполнения соединений между элементами (в противоположность «одновременному» способу). Термин гибридный относится также ко всем полупроводниковым системам (см. рис. 3-8), которые получаются соединением отдельных транзисторных или монолитных пластинок для выполнения более сложной функции. Например, шесть пластинок, каждая из которых представляет схему логического элемента, могут быть соединены в одном корпусе для выполнения одной электронной функции полного сумматора.

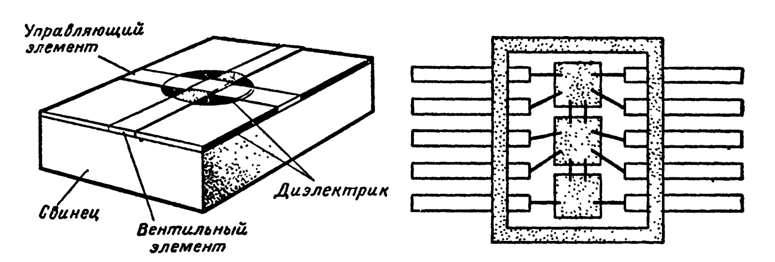


Рис. 3-7. Пленочный криотронный элемент.

Рис. 3-8. Гибридная интегральная схема.

ВОПРОСЫ

1. **Криотрон — магнитная интегральная схема, основанная на явлении низкотемпературной . . . .**
2. **Один из путей получения интегральных гибридных схем состоит в соединении транзисторных пластинок и . . . . . . резисторов.**

3. **Преимущества гибридных схем заключаются в возможности использования специально . . . . элементов и увеличении плотности . . . .**
4. **Гибридные схемы часто являются более . . . ., так как их элементы должны быть проверены в дискретном виде, а затем как составные части системы.**

ОТВЕТЫ

1. Криотрон — магнитная интегральная схема, основанная на явлении низкотемпературной **сверхпроводимости.**
2. Один из путей получения интегральных гибридных схем состоит в ссединении транзисторных пластинок и **тонкопленочных** резисторов.
3. Преимущества гибридных схем заключаются в возможности использования специально **подобранных** элементов и увеличении плотности **монтажа.**
4. Гибридные схемы часто являются более **дорогими,** так как их элементы должны быть проверены в дискретном виде, а затем как составные части системы.

Плотность упаковки. Плотность упаковки определяется числом приборов или эквивалентных приборов в единице объема. Если функциональные возможности системы пропорциональны числу ис-

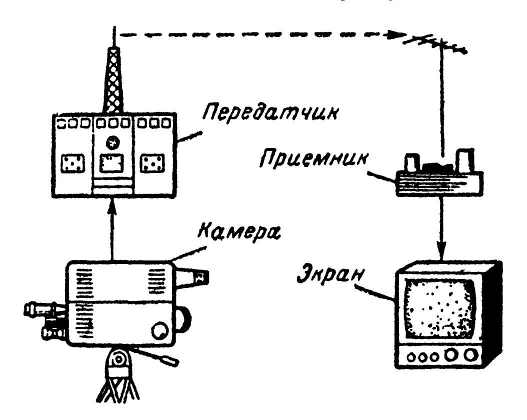


Рис. 3-9. Элементы телевизионной системы.

пользуемых элементов, то плотность упаковки является важнейшей характеристикой качества того или иного пути микроминиатюризации. В дополнение к объему отдельных компонентов необходимо учитывать множество факторов. К ним относятся необходимый объем для межэлементных соединений, теплоотвода, доступа к элементам при ремонте и т. п.

Система и подсистема. Система — совокупность элементов и устройств, связанных между собой для выполнения определенной

законченной функции. Подсистема является частью общей системы и выполняет отдельные задачи, входящие в реализацию системной функции. На рис. 3-9 для примера показаны составные части телевизионной системы.

3-2. ПУТИ МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИИ

Наиболее простой путь уменьшения размеров заданного электронного устройства состоит в использовании элементов меньших размеров при сохранении тех же операций для выполнения соединений. Сравнение элементов настольного и карманного приемников иллюстрирует эту возможность. Не только транзисторы, заменяющие лампы, имеют меньшие размеры, но и другие элементы,— громкоговорители, подстроечные конденсаторы, трансформаторы — конструируются таким образом, чтобы занимать меньший объем. Этот путь ограничивается возможным ухудшением характеристик из-за уменьшения размеров, например громкоговорителя, или увеличением стоимости из-за трудностей в изготовлении и соединении между собой сверхминиатюрных элементов, таких как трансформаторы.

Дискретные элементы. Использование микроэлементов дает существенный выигрыш в уменьшении объема электронного оборудования. Например, в печатной схеме обычного цифрового логического элемента все элементы располагаются в тонком слое на поверхности плоской платы. Связь между платой и остальной частью системы осуществляется через край печатной платы (см. рис. 3-3). Ограничения, связанные с двумерностью расположения схемы, могут быть сняты использованием трехмерного расположения путем укладывания плат одной на другую. Поэтому применение стандартных форм позволяет увеличить плотность упаковки без усложнения процесса выполнения соединений.

ВОПРОСЫ

1. **Факторы, определяющие плотность упаковки, включают: размеры элементов, необходимость . . . ., обслуживание и выполнение . . . .**
2. **Проблемы, которые могут встречаться при использовании миниатюрных элементов, заключаются в увеличении . . . . и усложнении выполнения . . . .**
3. **При использовании печатных плат большинство элементов располагается в . . . . пространстве.**

ОТВЕТЫ

1. Факторы, определяющие плотность упаковки, включают: размеры элементов, необходимость **теплоотвода**, обслуживание и выполнение **соединений.**
2. Проблемы, которые могут встречаться при использовании миниатюрных элементов, заключаются в увеличении **стоимости** и усложнении выполнения **соединений.**
3. При использовании печатных плат большинство элементов располагается в **двумерном** пространстве.

Интегральные схемы. Весьма реальным ограничением на минимальные размеры дискретных элементов являются их механическая прочность и простота в эксплуатации при использовании ручного труда. При очень тонких выводах резисторов, слишком хрупких конденсаторах и малых расстояниях между электродами транзисторов невозможно использовать быструю и дешевую механизацию для соединения этих элементов в электронные системы. Необходима разработка специальных инструментов и соответствующих операций при сборке. Это приводит к значительному увеличению стоимости. В случае же, когда изготовитель систем покупает интегральные схемы, он получает их в корпусе (рис. 3-10), что позволяет выполнять соеди-

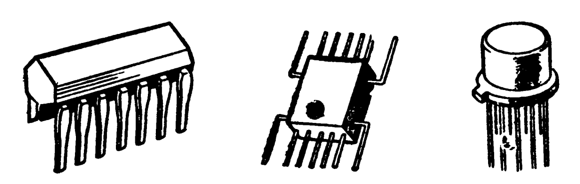
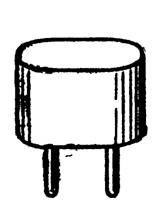


Рис. 3-10. Корпуса интегральных схем.

нения обычными способами. Важно, что корпус содержит сверхминиатюрные элементы, уже соединенные между собой.

Тонкопленочная технология используется для изготовления интегральных схем, не требующих транзисторов и диодов. Примерами таких схем могут быть фильтры, резистивные матрицы, тонкопленочные элементы памяти.

Функциональные приборы. Термин — ф у н к ц и о н а л ь н ы е п р и б о р ы определяет такой класс схем, которые выполняют определенные электронные функции, эквивалентные функции, выполняемой совокупностью нескольких дискретных элементов, когда эти элементы в схеме не могут быть непосредственно выделены. Выполнение электронных функций достигается за счет использования объемных свойств некоторых специальных материалов. Примером может служить кристалл кварцевого фильтра (рис. 3-11). Акустиче-



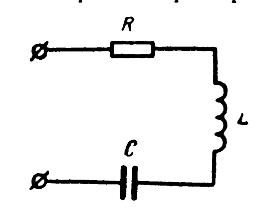


Рис. 3-11. Кристаллический фильтр и его эквивалентная схема.

ские и пьезоэлектрические свойства материала позволяют получать резонансную систему, хотя сам материал не содержит катушек индуктивностей или конденсаторов в виде дискретных элементов. Существуют другие приборы такого же класса, например, акустические линии задержки, которые благодаря своим малым размерам могут использоваться для миниатюризации оборудования, так как позволяют исключать индуктивности. Функциональные приборы не пред-

назначаются для выполнения функций, отличных от их «естественных» аналогов, поэтому использование функциональных приборов в электронных системах ограничивается специальными случаями.

ВОПРОСЫ

1. **Минимальные размеры дискретных элементов ограничены простотой . . . . и способами выполнения . . . .**
2. **Изготовитель интегральных схем может выполнять соединения элементов достаточно просто, так как эта операция является частью всего . . . . процесса.**
3. **Технология тонких пленок более простая, чем технология полупроводниковых приборов, но не позволяет изготовлять . . . . и . . . .**
4. **Функциональные приборы выполняют электронные функции благодаря использованию . . . . свойств специальных материалов.**

ОТВЕТЫ

1. Минимальные размеры дискретных элементов ограничены простотой **эксплуатации** и способами выполнения **соединений.**
2. Изготовитель интегральных схем может выполнять соединения элементов достаточно просто, так как эта операция является частью всего **производственного** процесса.
3. Технология тонких пленок более простая, чем технология полупроводниковых приборов, но не позволяет изготовлять **транзисторы и диоды.**
4. Функциональные приборы выполняют электронные функции благодаря использованию **объемных** свойств специальных материалов.

3-3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИИ

Всякий раз, когда прикладываемое к прибору напряжение вызывает протекание тока, выделяется тепловая энергия. Если это тепло не отводится, то температура прибора будет возрастать. Рост температуры происходит обратно пропорционально массе, поэтому меньший по размерам прибор при тех же условиях отвода тепла будет нагреваться сильнее.

Рассеяние тепла. Если выделение тепла происходит непрерывно, то должны быть обеспечены меры для его отвода. В случае использования дискретных элементов выделяемое тепло отводится, как правило, путем конвекции (движущимся потоком воздуха). Тепловая энергия передается от места нагрева внутри прибора к поверхности и затем от поверхности прибора в окружающее пространство. Поток тепловой энергии можно сравнить с током в электрической цепи. При этом температура соответствует напряжению. Изменение температуры пропорционально результирующему потоку тепловой энергии и «тепловому сопротивлению». Соответствующая тепловая эквивалентная схема показана на рис. 3-12. Резистор R_1

представляет собой «сопротивление» внутреннему потоку тепловой энергии, а сопротивление резистора $R_к$ характеризует движение тепла от поверхности прибора в окружающее пространство. Воздух или окружающее пространство представлены в виде «поглотителя тепла». «Поглотитель» может абсорбировать любое количество тепловой энергии без существенного повышения температуры. Конденсаторы в схеме соответствуют «температурной массе» (теплоемкости) прибора. Последнее связано с тем, что распространение тепловой энергии обладает инерционностью и требуется определенное время для нагрева прибора после приложения мощности. Согласно

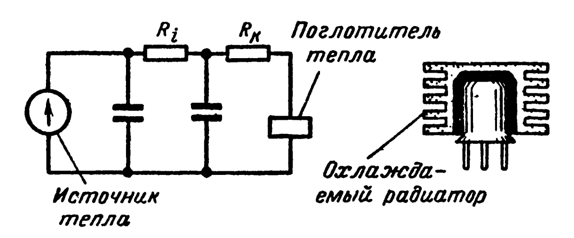


Рис. 3-12. Тепловая эквивалентная схема.

тепловой эквивалентной схеме увеличение температуры T, соответствующее скорости теплового потока H, равно:

$$T = H(R_i + R_к).$$

Рисунок 3-12 иллюстрирует возможность уменьшения $R_к$ для приборов с небольшими размерами путем использования охлаждаемого радиатора, увеличивающего интенсивность теплоотвода.

С уменьшением размеров приборов величины R_i и $R_к$ возрастают. «Сопротивление» конвекционному обмену увеличивается, потому что при этом уменьшается площадь поверхности. Внутреннее сопротивление возрастает, так как уменьшается сечение при движении тепла к поверхности. По мере увеличения плотности монтажа, «свободное пространство» внутри прибора становится меньше, а расстояние до «поглотителя тепла» — поверхности всего устройства — увеличивается. Это приводит к добавочному увеличению теплового сопротивления. Тепловое сопротивление устройства может быть уменьшено путем принудительного воздушного охлаждения, заключения отдельных частей в пластик для отвода тепла при помощи проводимости или изготовления специальных поглотителей тепла (панелей из материала с хорошей теплопроводностью, например, меди), соединяющих внутренние части оборудования с поверхностью. По мере уменьшения устройств до микроскопических размеров выполнение всех этих мер становится все более трудным. Поэтому необходимость теплоотвода ограничивает минимальные размеры электронных элементов.

ВОПРОСЫ

1. Температура увеличивается прямо пропорционально рассеиваемой мощности и обратно пропорционально .... прибора.

2. **Поток тепла от поверхности прибора происходит главным образом за счет . . . .**
3. **Тепловое сопротивление прибора с малыми размерами может быть уменьшено путем использования . . . .**
4 **Тепловое сопротивление системы с плотной упаковкой может быть уменьшено . . . . или использованием теплового « . . . . ».**

ОТВЕТЫ

1. Температура увеличивается прямо пропорционально рассеиваемой мощности и обратно пропорционально **размерам** прибора.
2. Поток тепла от поверхности прибора происходит главным образом за счет **конвекции.**
3. Тепловое сопротивление прибора с малыми размерами может быть уменьшено путем использования **охлаждаемого радиатора.**
4. Тепловое сопротивление системы с плотной упаковкой может быть уменьшено **принудительным воздушным охлаждением** или использованием теплового **«поглотителя».**

Точность изготовления. Размеры любого прибора имеют определенный разброс, связанный со способом его изготовления и используемым при этом инструментом. Детали, изготовленные на токарном станке, будут отражать точность хода резца. Фотолитографические контуры ограничены разрешающей способностью системы линз, используемых для их получения. Процесс диффузии чувствителен к температуре и свойствам окружающей среды. Все эти колебания приводят к ограничению физических размеров электронных элементов.

Точность процессов, используемых для изготовления полупроводниковых приборов, достаточно высока. Контроль размеров осуществляется с точностью до микрометров. Несмотря на это, разброс геометрических размеров продолжает ограничивать плотность упаковки этих приборов. На рис. 3-13 показана форма транзистора, который может быть использован как элемент полупроводниковой интегральной схемы. Размер окна для контакта с эмиттерной областью является минимальным размером в данном приборе. Оно должно располагаться точно внутри эмиттерной области, эмиттер — внутри базовой области, а база — внутри области коллектора. При допуске в 1 мкм между краями областей для предотвращения их взаимного перекрытия должно быть предусмотрено расстояние не менее 2 мкм. Нетрудно подсчитать, что такая точность позволяет изготавливать приборы с площадью около 200 мкм^2. Все эти рассуждения относятся к точности геометрических размеров используемых масок. Если же учесть эффекты боковой диффузии и увеличить размеры областей для обеспечения нормального функционирования, то минимальная площадь прибора будет около 800 мкм^2. Так как способы изготовления совершенствуются, то главными причинами, определяющими размер приборов, будут их электрические характеристики и теплоотвод.

На рис. 3-14 показана структура полупроводникового диффузионного или тонкопленочного резистора. Сопротивление резистора R

по приведенной на рисунке формуле определяется проводимостью материала ρ, толщиной пленки t, длиной l и шириной w. Будем считать, что проводимость материала и толщина пленки являются хорошо контролируемыми параметрами. Найдем связь точности изготовления ширины резистора и разброса значения R от номинального значения. Предположим, что точность изготовления составляет 2 мкм. Если ширина резистора равна 10 мкм, то разброс сопротивления резистора будет составлять 20%. Если же требуется точ-

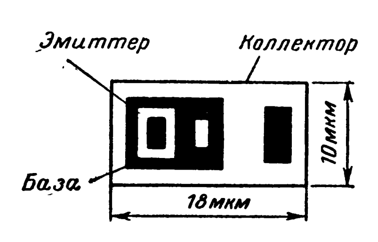


Рис. 3-13. Геометрическая форма транзистора.

$$R=\rho\frac{l}{tw}$$

Рис. 3-14. Геометрическая форма пленочного резистора.

ность сопротивления резистора 5%, то его ширина должна быть увеличена в 4 раза. При том же сопротивлении резистора увеличение ширины в 4 раза требует увеличения длины также в 4 раза, что приводит к 16-кратному увеличению площади.

ВОПРОСЫ

1. **Уменьшение физических размеров электронных элементов ограничивается производственным . . . . параметров.**
2. **Наименьшими областями в транзисторе являются эмиттерные и базовые . . . .**
3. **Если разброс сопротивления резистора определяется точностью выполнения его ширины, то уменьшение разброса в 2 раза требует увеличения площади резистора в . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Уменьшение физических размеров электронных элементов ограничивается производственным **разбросом** параметров.
2. Наименьшими областями в транзисторе являются эмиттерные и базовые **контактные окна.**
3. Если разброс сопротивления резистора определяется точностью выполнения его ширины, то уменьшение разброса в 2 раза требует увеличения площади резистора в **4 раза.**

Распределение легирующей примеси. Изготовление кремниевых планарных приборов основывается на проведении диффузии при высокой температуре. В результате диффузии в подложке полупроводникового материала получается определенное распределение ле-

гирующей примеси *n* и *p*-типа, как показано на рис. 3-15. Форма распределения подбирается таким образом, чтобы образовать структуру, соответствующую изготовляемому прибору. В некоторых случаях необходимо получение малых размеров. Так, например, при изготовлении высокочастотных приборов должны быть сведены к минимуму боковые размеры, с тем чтобы уменьшить паразитную емкость. С другой стороны, возможны требования создания относительно больших площадей. Например, для получения малого сопро-

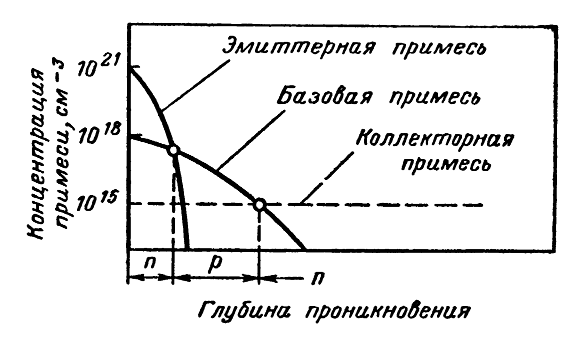


Рис. 3-15. Распределение легирующей примеси в транзисторе.

тивления насыщения требуется большой периметр эмиттера и большая площадь коллектора. Для работы с высоким напряжением коллекторная область должна быть относительно широкой, чтобы выдерживать соответствующую напряженность поля. Толщина полупроводниковой подложки чаще всего не зависит от глубины, на которую проникают легирующие примеси. Обычно толщина выбирается такой, которая обеспечивает достаточную механическую прочность, особенно при использовании ручных операций. Поскольку примеси диффундируют через окна, открытые на поверхности полупроводника, то возможна боковая диффузия. Изменение размеров в связи с боковым распространением примеси должно учитываться при определении минимальных размеров прибора.

Радиация. Большинство направлений микроэлектроники связано с полупроводниковыми приборами. Даже использование миниатюрных дискретных элементов наиболее эффективно тогда, когда оно сочетается с тонкопленочной техникой или интегральными схемами. Полупроводниковые приборы гораздо чувствительнее к радиации по сравнению с вакуумными лампами или дискретными пассивными элементами. Наиболее чувствительным параметром полупроводников к радиационному воздействию является время жизни носителей. Эта величина характеризует среднюю продолжительность существования *p*-носителей (дырок) в материале *n*-типа или *n*-носителей (электронов) в материале *p*-типа. В биполярном транзисторе неосновные носители должны существовать в течение интервала времени, достаточного для их пролета от эмиттера к коллектору. Поэтому микроэлектронное устройство, подвергающееся ядерному облучению или космической радиации относительно высокой плотности, должно быть обеспечено соответствующей защитой. Помимо защи-

ты должна быть предусмотрена возможность замены вышедших из строя приборов во время эксплуатации. Использование полевых транзисторов, приборов, работающих на основных носителях, уменьшает чувствительность электронных устройств к воздействию радиации.

ВОПРОСЫ

1. **Низкое сопротивление насыщения в транзисторе требует большого периметра . . . . и большой площади . . . .**
2. **Расчет размеров областей полупроводниковых приборов должен учитывать влияние . . . . диффузии.**
3. **Радиация ухудшает характеристики полупроводниковых приборов вследствие уменьшения времени жизни . . . .**
4. **Так как полевые транзисторы работают на . . . . носителях, то они менее чувствительны к радиации.**

ОТВЕТЫ

1. Низкое сопротивление насыщения в транзисторе требует большого периметра **эмиттера** и большой площади **коллекторной области.**
2. Расчет размеров областей полупроводниковых приборов должен учитывать влияние **боковой** диффузии.
3. Радиация ухудшает характеристики полупроводниковых приборов вследствие уменьшения времени жизни **неосновных носителей.**
4. Так как полевые транзисторы работают на **основных** носителях, то они менее чувствительны к радиации.

3-4. РАССЕЯНИЕ ТЕПЛА

Одна из сложных инженерных проблем, которую приходится решать при переходе от дискретных к микроэлектронным элементам в электронных устройствах, заключается в эффективном отводе тепла от внутренних частей оборудования в окружающее пространство. На рис. 3-16 показаны три возможных физических механизма пере-

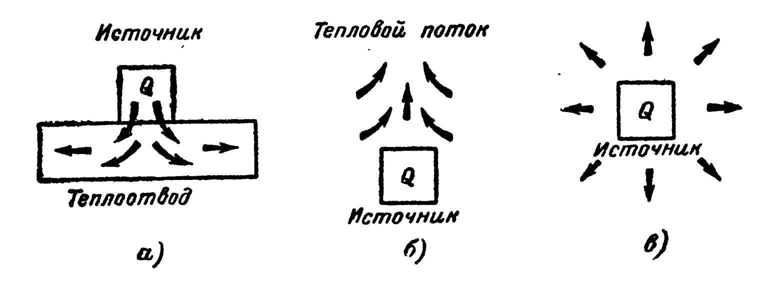


Рис. 3-16. Возможные механизмы отвода тепла.
а — теплопроводимость; *б* — конвекция; *в* — излучение.

дачи тепла. Это проводимость, конвекция и излучение. Скорость отвода тепла путем проводимости определяется как

$$H = kS\,\frac{T_1 - T_2}{t},$$

где H — скорость отвода тепла; k — термическая проводимость теплоотвода; S — площадь; T_1—T_2 — разница температур источника и теплоотвода; t — толщина теплоотвода.

Конвекция заключается в передаче тепла за счет движения нагреваемого вещества. Например, молекулы воздуха, соприкасаясь с поверхностью горячего резистора, будут разогреваться. Эти горячие молекулы будут диффундировать от резистора, унося с собой некоторую долю тепла. Скорость отвода тепла за счет конвекции равна

$$H = kS\,(T_1 - T_2).$$

Если отвод тепла осуществляется за счет обыкновенной диффузии, то процесс носит название «естественной конвекции». Если же эффективность охлаждения повышается за счет вентиляционного потока воздуха или накачивания специальной охлаждающей жидкости, то имеет место «принудительная конвекция».

Непосредственное охлаждение тела связано с тепловой радиацией или тепловым излучением. Количество тепла, теряемого нагретым телом, пропорционально четвертой степени его температуры, поэтому скорость теплового излучения равна:

$$H = \gamma S\left(T_1^4 - T_2^4\right),$$

где γ — коэффициент пропорциональности.

Скорость отвода тепла в любом случае прямо пропорциональна площади поверхности. Поэтому при уменьшении размеров устройства его температура будет повышаться. Это и является причиной возникновения проблемы с рассеянием тепла в микроэлектронике.

ВОПРОСЫ

1. **Существуют три способа охлаждения: использование ...., ... и ....**
2. **Передача тепла, связанная с движением нагреваемого вещества, называется ....**
3. **Отвод тепла в микроэлектронном оборудовании затрудняется, так как уменьшается .... элементов.**

ОТВЕТЫ

1. Существуют три способа охлаждения: использование **теплоотвода, конвекция** и **излучение.**
2. Передача тепла, связанная с движением нагреваемого вещества, называется **конвекцией.**
3. Отвод тепла в микроэлектронном оборудовании затрудняется, так как уменьшается **площадь поверхности** элементов.

Плотность упаковки. Цель микроэлектроники заключается в выполнении определенных электронных функций, при использовании наименьшего объема. Для миниатюризации устройства, содержащего некоторое количество элементов, необходимо их собрать вместе в небольшое пространство, поэтому проблема отвода тепла становится более сложной. Герметизация элементов препятствует свободному притоку воздуха к их поверхности, что уменьшает эффективность конвекционного охлаждения. Элементы, используемые в микроэлектронных устройствах, имеют небольшие размеры и, следовательно, малые поверхности для передачи тепла. Поэтому необходима

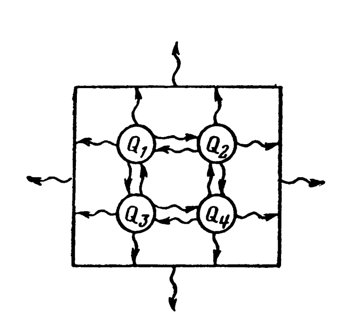


Рис. 3-17. Тепловое взаимодействие между соседними элементами.

Рис. 3-18. Изменение интенсивности отказов пленочных резисторов с температурой.

разработка мер для интенсификации процессов нормального охлаждения.

Увеличение плотности упаковки оборудования не только затрудняет проблему отвода тепла от элементов. Как видно из рис. 3-17, между близко расположенными элементами устанавливается тепловое взаимодействие. Поэтому такие элементы, как катушки индуктивности и конденсаторы, рассеивающие относительно небольшую мощность, будут нагреваться из-за близкого расположения с элементами, подвергающимися значительному нагреву — транзисторами и резисторами. Следовательно, при конструировании микроэлектронного оборудования вместе с решением традиционной проблемы отвода тепла необходимо учитывать распределение тепловых потоков в системе.

Эффекты при нагреве. Влияние нагрева на работу электронного оборудования может быть разделено на эффекты «непосредственного действия» и «вторичные» эффекты. Эффекты «непосредственного действия» проявляются в изменении электрических параметров элементов. Коэффициент усиления и входная проводимость транзисторов зависят от температуры. Номиналы резисторов увеличиваются с ростом температуры. Диэлектрическая проницаемость большинства диэлектриков в конденсаторах чувствительна к температуре. Изменение окружающей температуры влияет также на магнитную проницаемость ферритовых материалов и приводит к изменению резонансной частоты генераторов. Все эти изменения в большинстве случаев мо-

гут быть учтены эмпирическими и теоретическими зависимостями параметров от температуры. Последнее позволяет вносить необходимые поправки в проектируемые системы для работы в условиях больших температур. Обычно это достигается компромиссом между характеристиками отдельных схем и увеличением стоимости всего оборудования.

Более существенно влияние температуры на ухудшение надежности электронных элементов. На рис. 3-18 показана такая зависимость для пленочных резисторов. Изменение температур от 20 до 70° С приводит к увеличению интенсивности отказов более чем в 2 раза. После этого значение интенсивности отказов становится недопустимо большим. Приведенная зависимость не одинакова для различных элементов.

ВОПРОСЫ

1. **Эффекты «непосредственного действия» приводят к .... большинства элементов.**
2. **«Вторичные» эффекты при высоких температурах приводят к уменьшению .... элементов.**

ОТВЕТЫ

1. Эффекты «непосредственного действия» приводят к **изменению параметров** большинства элементов.
2. «Вторичные» эффекты при высоких температурах приводят к уменьшению **надежности** элементов.

Сверхпроводящие приборы. Такие сверхпроводящие приборы, как криотроны, являются самыми миниатюрными электронными приборами. Кроме того, они рассеивают очень малую мощность. Поэтому при их использовании может быть достигнута очень высокая

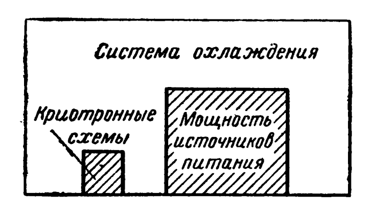


Рис. 3-19. Криотронная система

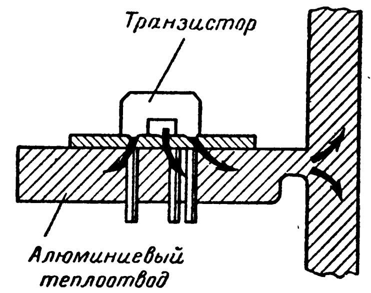


Рис. 3-20. Внутренняя передача тепла.

плотность упаковки. Однако чтобы получить эффект сверхпроводимости, температура системы должна поддерживаться близкой к абсолютному нулю. Это требует дорогого и сложного холодильного оборудования. Масса и мощность источников питания холодильной системы в тысячи раз превышают массу и рассеиваемую мощность сверхпроводящих приборов (рис. 3-19). Несмотря на это, если электронные функции, выполняемые криотронной системой, достаточно

сложны и велики по объему, использование криотронов может дать выигрыш. Одним из первых применений криогенной техники явились запоминающие устройства вычислительных машин. Это объясняется, во-первых, тем, что стандартная форма каждого элемента памяти облегчает его изготовление и, во-вторых, память вычислительной машины — одна из частей системы, где увеличение емкости легко достигается использованием преимуществ криогенных элементов. Специфика сверхпроводящих приборов заключается в том, что источником тепла является скорее окружающая температура, чем сами элементы.

Способы охлаждения. В большинстве случаев микроэлектронные схемы не изолированы в пространстве, а являются составными частями сложного оборудования. Это ограничивает использование конвекции и излучения для рассеяния тепла. Передача тепла может быть разделена на две части: внутреннюю и внешнюю. Внутренняя передача сводится к отводу тепла от элемента, где оно выделяется, к корпусу устройства, в котором располагается элемент. На рис. 3-20 показано, как используется проводимость для передачи тепла от мощного транзистора к алюминиевому теплоотводу и затем к каркасу, на котором крепится устройство. Если холодный воздух обдувает поверхности теплоотвода и каркаса, то принудительная конвекция облегчает процесс охлаждения. Чаще всего проблема внутренней передачи тепла решается так же, как в рассмотренном примере. Тепло отводится путем проводимости к поверхности микросхемы или каркасу модуля и затем удаляется с помощью принудительной конвекции.

ВОПРОСЫ

1. **Химические процессы, приводящие к выходу электронных элементов из строя, развиваются быстрее при .... температуре.**
2. **Температура криогенных приборов должна поддерживаться близкой к температуре ....**
3. **Наиболее громоздкими частями криогенной системы являются источники питания и .... установки.**
4. **Внутренняя передача тепла обычно осуществляется путем .... и ....**

ОТВЕТЫ

1. Химические процессы, приводящие к выходу электронных элементов из строя, развиваются быстрее при **повышенной** температуре.
2. Температура криогенных приборов должна поддерживаться близкой к температуре **абсолютного нуля.**
3. Наиболее громоздкими частями криогенной системы являются источники питания и **холодильные** установки.
4. Внутренняя передача тепла обычно осуществляется путем **проводимости и принудительной конвекции.**

Кипение или испарение является частным случаем отвода тепла с помощью конвекции. Этот механизм иллюстрируется на рис. 3-21. Охлаждаемая электронная система герметически закрывается и помещается в контейнер, частично заполненный жидкостью с низкой

температурой кипения, например фреоном. При повышении температуры системы фреон испаряется и осаждается на внутренних стенках контейнера, где после охлаждения конденсируется и снова превращается в жидкость. Этот способ очень эффективен, так как поглощение тепла кипящим охладителем во много раз превышает поглощение за счет изменения температуры охладителя и его последующей диффузии. С физической точки зрения это объясняется тем, что энергия парообразного охладителя много больше его энергии в жидком состоянии.

Внешний отвод тепла обычно осуществляется конвекцией и излучением. В случае наземных систем чаще всего используется конвекция. Установка вычислительной машины в комнату с кондиционированным воздухом является примером принудительной конвекции. Более мелкие устройства, например телевизоры, используют свободную конвекцию. Часть тепла при этом отводится за счет излучения, но это обычно очень малая доля от общего количества выделяемого тепла.

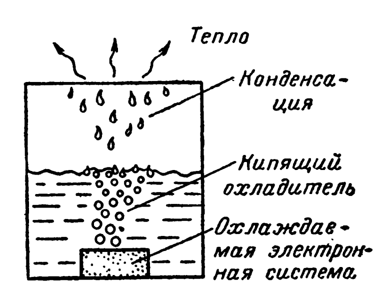


Рис. 3-21. Отвод тепла кипящим фреоном.

В космических аппаратах все тепло отводится за счет излучения. Мощность, рассеиваемая внутренними элементами, достигает оболочки спутника посредством проводимости и конвекции, но так как в космическом вакууме отсутствуют твердые тела, жидкости или газы, окончательный отвод тепла осуществляется только излучением. Для воздушных летательных аппаратов средних скоростей используются оба механизма: тепловое излучение и принудительная конвекция. Однако по мере возрастания скорости самолетов молекулы воздуха за счет трения скорее способствуют увеличению нагрева обшивки, чем охлаждению путем конвекции, поэтому излучение снова становится определяющим фактором при рассеянии тепла.

ВОПРОСЫ

1. **Наиболее эффективной формой конвекционного отвода тепла является испарение . . . . жидкости.**
2. **Внешний отвод тепла обычно выполняется средствами . . . . и . . . .**
3. **Рассеяние тепла с поверхности космических аппаратов осуществляется . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Наиболее эффективной формой конвекционного отвода тепла является испарение **кипящей** жидкости.
2. Внешний отвод тепла обычно выполняется средствами **конвекции и излучения.**
3. Рассеяние тепла с поверхности космических аппаратов осуществляется **излучением.**

3-5. НАДЕЖНОСТЬ И МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИЯ

Надежность миниатюрного электронного оборудования выше надежности аппаратуры на дискретных элементах. Повышение надежности является жизненно необходимым для всех микроэлектронных систем. Микроэлектроника позволяет собирать много элементов в небольшой объем. Если бы надежность микросхем была ниже надежности обычных схем, то повышение плотности упаковки привело бы скорее к ухудшению параметров систем, чем получению каких-либо преимуществ. Обнаружение дефекта в плотном монтаже является дорогостоящей операцией, а ремонт часто становится практически невозможным. Повышенная надежность микроэлектронного оборудования достигается за счет более прочного монтажа, совершенства производственных процессов, механизации сборки, т. е. за счет использования всех преимуществ микроэлектронной технологии.

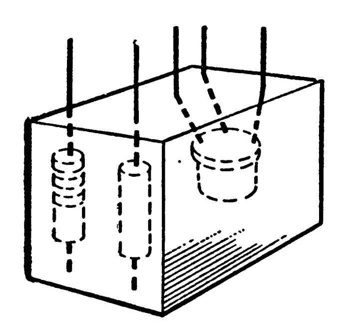


Рис. 3-22. Герметизация модуля.

Механическая прочность. Использование микроэлектронных компонентов приводит к значительному уменьшению массы и прочности типовых схемных элементов. При воздействии таких факторов, как удар, вибрация или сильное ускорение, внешние силы могут разрушить не только сами элементы, но и их соединения. Небольшой объем, требуемый для микроэлектронных схем, позволяет заключать отдельные функциональные блоки в пластик, как показано на рис. 3-22. Это приводит к повышению прочности элементов и облегчению ручных операций при работе с микродеталями.

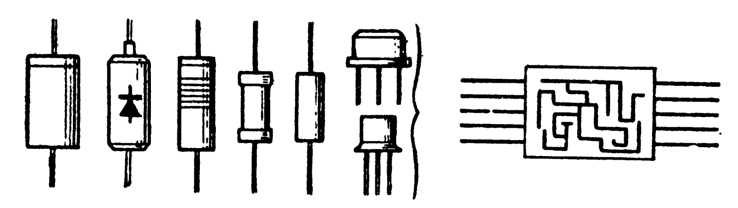


Рис. 3-23. Уменьшение числа корпусов.

Специфика технологии. Техника тонких пленок и технология полупроводниковых интегральных схем позволяют значительно сократить число различных операций и количество необходимых материалов, требуемых для создания электронных блоков. Это уменьшает вероятность появления производственных дефектов и сокращает число соединений между различными материалами. Последнее уменьшает величину механических напряжений, возникающих из-за несоответствия температурных коэффициентов расширения, и ослабляет химическую коррозию соединений

Герметизация и ручной труд. Миниатюризация элементов позволяет использовать один корпус для нескольких отдельных элементов. Создание интегральных схем является логическим продолжением этого принципа (заключения элементов, необходимых для выполнения функции, в один корпус). Поэтому использование микроэлектронной технологии уменьшает число корпусов, необходимых для создания данного электронного устройства. Опыт работы с дискретными элементами показал, что основные проблемы надежности связаны с герметизацией корпусов и выполнением соединений. Следовательно, уменьшение числа корпусов и соответствующих соединений между ними (рис. 3-23) при использовании микросхем дает определенный вклад в повышение надежности систем.

С разработкой интегральных схем появилась тенденция стандартизации корпусов. Подобная стандартизация позволяет совершенствовать и специализировать ручные операции и необходимый инструмент для облегчения сборки электронных систем. Это приводит не только к удешевлению производства, но и, благодаря сокращению возможных ошибок при сборке, к повышению надежности системы.

ВОПРОСЫ

1. **Механическая прочность может быть улучшеиа путем использования . . . .**
2. **Сокращение числа соединений между различными материалами приводит к уменьшению влияния . . . . температурных коэффициентов и ослаблению процессов химической . . . .**
3. **Надежность систем может быть повышена путем уменьшения числа используемых . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Механическая прочность может быть улучшена путем использования **пластиковых модулей.**
2. Сокращение числа соединений между различными материалами приводит к уменьшению влияния **разности** температурных коэффициентов и ослаблению процессов химической **коррозии.**
3. Надежность систем может быть повышена путем уменьшения числа используемых **корпусов.**

Резервирование. Повышение надежности системы обеспечивается введением дополнительных элементов параллельно с основной схемой для обеспечения нормального функционирования системы в случае сбоя. На рис. 3-24 показана схема, в которой каскад *A* усиливает и передает входной сигнал каскаду *B*. Если усилитель *A* выходит из строя, то нарушается работа всей схемы. Пунктирный прямоугольник на рисунке включает дополнительный или резервный усилитель *A′*, который соединен параллельно с основным усилителем *A*. Теперь система будет функционировать нормально, если работает один из усилителей *A*. Так как вероятность выхода из строя обоих усилителей много меньше, чем возможность повреждения одного каскада, то надежность системы улучшается. Введение резервирования приводит, естественно, к увеличению общей стоимости схемы, но

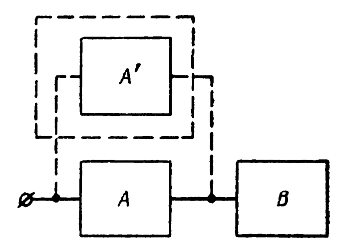


Рис. 3-24. Повышение надежности путем резервирования.

обслуживание системы становится более экономичным. В таких областях, как космическая и ракетная техника, где замена оборудования зачастую невозможна, резервирование является очень эффективным способом повышения надежности.

3-6. ПРОБЛЕМА ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Очевидное требование к источникам питания заключается в обеспечении постоянным током при определенном напряжении, причем источники питания должны обеспечивать постоянство напряжения, несмотря на изменения значения тока. Иными словами, должна осуществляться хорошая стабилизация напряжения.

Малогабаритные источники питания должны быть снабжены первичным источником энергии и вторичными устройствами, обеспечивающими выпрямление, фильтрацию и стабилизацию напряжения. В качестве первичного источника может быть использован бензиновый мотор-генератор. Однако масса и выхлопные газы таких генераторов препятствуют их применению в космической аппаратуре. В табл. 3-1 приведены характеристики некоторых источников питания, удовлетворяющие требованиям космических систем.

Таблица 3-1

Источник	Максимальная емкость, Вт·ч/кг	Максимальный срок службы, ч
Химические батареи	180	1000
Топливные элементы	1100	1000
Ядерные батареи	6600	100 000
Солнечные элементы	13 000	20 000
Химические батареи и солнечные элементы	6600	10 000 10 000

Основными параметрами источника питания являются количество энергии на единицу массы и срок службы.

ВОПРОСЫ

1. **Резервирование является наиболее эффективным способом повышения надежности, когда .... неисправных частей оборудования невозможна.**

2. **Источники питания должны обеспечивать протекание постоянного тока при стабилизированном ....**

ОТВЕТЫ

1. Резервирование является наиболее эффективным способом повышения надежности, когда **замена** неисправных частей оборудования невозможна.
2. Источники питания должны обеспечивать протекание постоянного тока при стабилизированном **напряжении.**

Химические батареи, удобные и экономичные источники энергии для наземной аппаратуры, являются относительно неэффективными с точки зрения удельной мощности и поэтому не подходят для использования в космических аппаратах. Топливные элементы, которые вырабатывают электрическую энергию за счет тепла окислительно-восстановительных реакций, были эффективно использованы в космической программе США. Ядерные батареи используют тепло ядерных реакций для нагрева термоэлектрических генераторов, которые затем непосредственно преобразуют тепловую энергию в электрическую. Продолжительный срок службы этих источников питания позволяет использовать их для космических полетов.

Солнечные элементы — полупроводниковые приборы, способные преобразовывать солнечный свет непосредственно в электрическую энергию, являются эффективными источниками, имеющими длительный срок службы. Большинство спутников, предназначенных для передачи какой-либо информации в течение продолжительного периода времени, используют эти элементы. Они служат в качестве генераторов мощности до тех пор, пока радиация и микрометеориты, существующие в космическом пространстве, не вызовут значительных повреждений и дефектов в полупроводниковых элементах. Очевидным недостатком солнечных элементов является отсутствие энергии в момент, когда электронная система находится в тени. Объединение с химическими батареями, допускающими перезарядку, позволяет создавать непрерывно действующие источники питания большой удельной мощности и с продолжительным сроком службы, но с несколько большей массой. При освещении солнечные элементы вырабатывают энергию и заряжают батареи. В тени оборудование питается от энергии, хранимой в батареях.

Размеры и масса. В тех областях, где минимальные размеры и масса являются главными показателями электронного оборудования, использование микроэлектронной техники можно считать эффективным до тех пор, пока и объем источников питания не станет больше, чем соответствующие показатели функциональных схем.

ВОПРОСЫ

1. **Для миниатюризации электронного оборудования могут быть выбраны различные пути.**

   а) **Возможные направления миниатюризации включают использование .... дискретных элементов, ... схем и .... приборов.**

   б) **Физические ограничения при миниатюризации связаны с проблемой рассеяния .... и геометрической точностью .... элементов.**

2. **При выборе того или иного пути миниатюризации должны быть учтены такие факторы, как стоимость, надежность и ограничения, связанные с используемой технологией.**

а) **Повышение температуры электронного оборудования приводит к . . . . параметров элементов и снижению их . . . .**

б) **Надежность микроэлектронных систем превышает надежность систем на дискретных элементах, так как при этом улучшается . . . . прочность, уменьшается число производственных . . . . , сокращается число соединений между . . . . материалами и уменьшается число корпусов и . . . . на одну выполняемую функцию.**

ОТВЕТЫ

1.*а*) Возможные направления миниатюризации включают использование **миниатюрных** дискретных элементов, **интегральных** схем и **функциональных** приборов.

б) Физические ограничения при миниатюризации связаны с проблемой рассеяния тепла и геометрической точностью **изготовления** элементов.

2.*а*) Повышение температуры электронного оборудования приводит к **изменению** параметров элементов и снижению их **надежности.**

б) Надежность микроэлектронных систем превышает надежность систем на дискретных элементах, так как при этом улучшается **механическая** прочность, уменьшается число производственных **операций**, сокращается число соединений между **различными** материалами и уменьшается число корпусов и **межэлементных соединений** на одну выполняемую функцию.

Глава четвертая

ТЕХНИКА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С чем Вы познакомитесь в этой главе. В течение многих лет изготовители электронного оборудования применяли для конструирования аппаратуры дискретные элементы. Поэтому когда требования бортовых систем в самолетах, ракетах и космических аппаратах вызвали необходимость миниатюризации, естественно, что первые шаги в этом направлении были сделаны на базе технологии, аналогичной технологии обычных дискретных элементов. В этой главе Вы познакомитесь с тем, как можно осуществить микроминиатюризацию путем использования дискретных элементов. Рассмотрены такие относительные критерии для оценки систем, как экономичность и надежность, которые объясняют эффективность применения традиционной технологии для изготовления микроэлектронного оборудования. Читатель познакомится с различными видами электронных дискретных

микроэлементов и их минимальными размерами. Описаны основные проблемы выполнения межэлементных соединений и сборки систем на дискретных элементах, рассмотрена возможность использования «упорядоченной геометрии».

4-1. ПРЕИМУЩЕСТВА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Использование дискретных элементов имеет большие преимущества при создании микроэлектронного оборудования. Некоторые наиболее важные из них иллюстрируются на рис. 4-1.

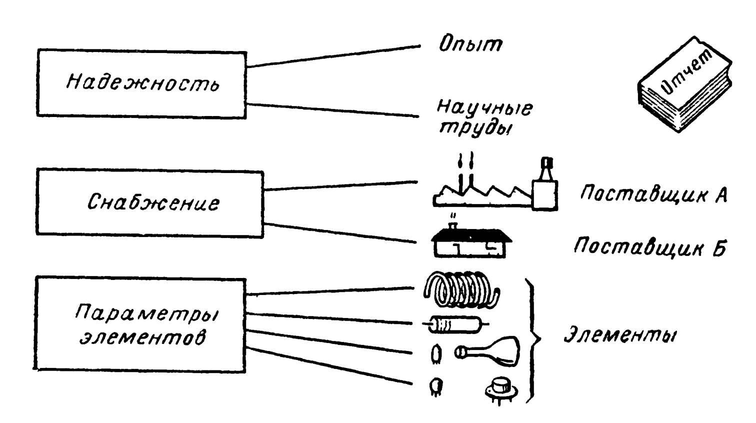


Рис. 4-1. Преимущества дискретных элементов.

Надежность. Инженер, проектирующий систему на дискретных элементах, имеет очень широкие возможности при их выборе, так как выпуск элементов хорошо освоен. Большой опыт, накопленный изготовителями элементов, позволяет хорошо изучить производственные ошибки, определить и исключить различные виды дефектов и установить эффективный контроль производственных процессов. Дефекты изготовления являются одним из главных источников отказов оборудования, поэтому использование технологически отработанных элементов позволяет уменьшить число причин, ухудшающих надежность системы. Другое преимущество заключается в том, что возможно использование опыта, накопленного при изготовлении и конструировании электронных устройств на этих элементах. Как правило, конструкторы электронного оборудования имеют научные отчеты, в которых дается информация о важнейших параметрах и надежности основных используемых деталей.

Параметры элементов. При проектировании устройства для выполнения заданной функции общие требования к системе позволяют сформулировать требования к отдельным подсистемам. Предположим, что необходимо усилить принимаемый антенной сигнал (рис. 4-2). Для выполнения этого необходимо использовать три подсистемы. Усилитель высоких частот (УВЧ) должен обеспечить усиление и низкий уровень шума на высоких частотах. К усилителю про-

межуточной частоты (УПЧ) предъявляются требования в получении высокого коэффициента усиления на средних частотах. Выходной каскад должен усилить сигнал по мощности. Очевидно, что наиболее оптимальные элементы для одного каскада могут быть совершенно неподходящими для другого. На рис. 4-3 показаны корпуса транзисторов, предназначенные для работы на высоких частотах

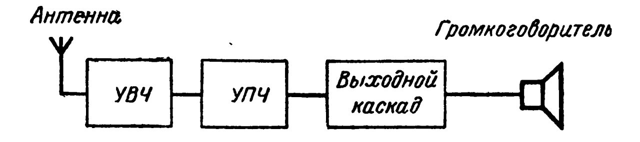


Рис. 4-2. Блок-схема радиоприемника.

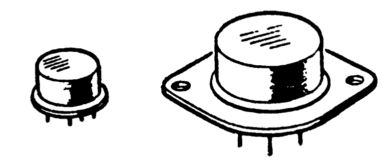


Рис. 4-3. Корпуса транзисторов.

и при больших уровнях мощности. В первом случае требуется четвертый вывод для заземления корпуса. Требования же мощного выхода приводят к необходимости применения массивного корпуса для рассеяния тепла, причем в этом случае могут быть использованы только два внешних вывода, так как коллектор транзистора непосредственно соединяется с корпусом. Использование дискретных элементов позволяет конструктору выбирать элементы, опираясь исключительно на соображения экономии и получения нужных характеристик.

ВОПРОСЫ

1. **Уменьшение числа дефектов при изготовлении технологически отработанных элементов приводит к повышению . . . . системы.**
2. **Дискретные элементы позволяют конструктору оптимальным образом использовать их . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Уменьшение числа дефектов при изготовлении технологически отработанных элементов приводит к повышению **надежности** системы.
2. Дискретные элементы позволяют конструктору оптимальным образом использовать их **положительные качества.**

Дополнительные условия. Изготовитель дискретных элементов обеспечивает возможность их сборки с помощью обычных способов выполнения соединений. Поэтому требуется лишь небольшая модификация в оборудовании и технологии сборки для использования миниатюрных элементов в микроэлектронных системах. Схема на

дискретных элементах может быть собрана на экспериментальной плате. В связи с этим необходимые коррективы в выборе величин элементов и формы схемы могут быть внесены на ранней стадии проектирования.

Если сбои в работе имеют место при эксплуатации готового электронного устройства, то замена элементов после определения причины отказа в работе может быть легко осуществлена из нахо-

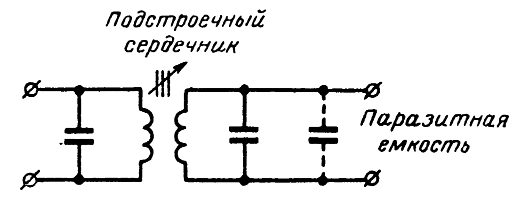


Рис. 4-4. Регулировка подстроечного трансформатора.

дящихся в распоряжении запасных частей. Вышедшие из строя или неудовлетворительно работающие элементы могут быть заменены без нарушения работы других частей системы. Использование дискретных элементов позволяет производить окончательный подбор параметров в системе после сборки. На рис. 4-4 иллюстрируется такая возможность. Если нормальная работа трансформатора, показавшего удовлетворительные результаты перед сборкой, нарушается из-за наличия паразитных емкостей, то использование подстроечного сердечника позволяет компенсировать это нежелательное влияние.

4-2. ТИПЫ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для выполнения электронных функций требуется два класса элементов — активные и пассивные. Три основных вида пассивных элементов показаны на рис. 4-5. На низких частотах только резисто-

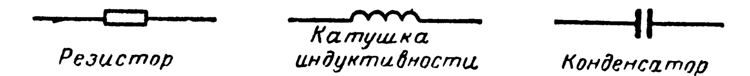


Рис. 4-5. Пассивные электронные элементы.

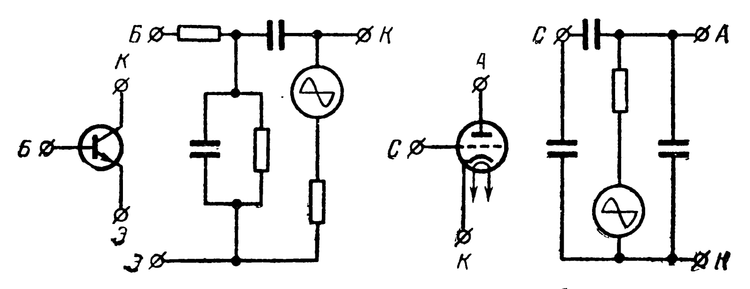


Рис. 4-6. Эквивалентные схемы активных приборов.

ры определяют работу схемы. Использование катушек индуктивности и конденсаторов на высоких частотах позволяет получать функции частотной селекции. Термин **пассивный** означает, что эти элементы не могут обеспечить усиление мощности. Выходная мощность пассивных цепей всегда меньше входной. Активные приборы могут действовать как источники энергии и поэтому используются для усиления мощности. На рис. 4-6 показаны эквивалентные схемы двух активных приборов: транзистора и электровакуумного триода. Активное свойство этих приборов отражается генератором напряжения.

ВОПРОСЫ

1. **Известны два класса элементов — . . . . и . . . . приборы.**
2. **Пассивные элементы включают . . . . , ... и . . . .**
3. **Активные приборы используются в качестве усилителей мощности, потому что они действуют как источники . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Известны два класса элементов — **активные** и **пассивные** приборы.
2. Пассивные элементы включают **резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы.**
3. Активные приборы используются в качестве усилителей мощности, потому что они действуют как источники **энергии.**

Резисторы. Резисторы, применяемые в электронных схемах, могут иметь сопротивление от нескольких ом до десятков мегом. Однако размеры резисторов не зависят от их сопротивления, а определяются значением рассеиваемой мощности. Типовые размеры цилиндрического резистора мощностью 0,1 Вт показаны на рис. 4-7, *а*. Многие

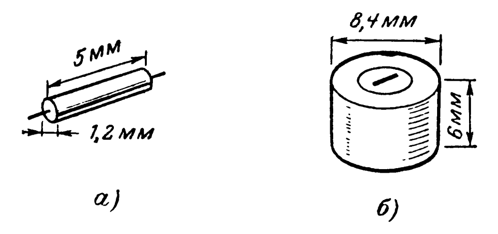


Рис. 4-7. Миниатюрные резисторы.
а — постоянный, *б* — переменный.

электронные системы требуют использования переменных резисторов, например для изменения коэффициента усиления или балансировки. На рис. 4-7, *б* даны размеры наименьшего из известных переменных резисторов. Очевидно, что постоянный резистор занимает меньший объем. Кроме того, необходимость доступа к регулирующему пазу

ограничивает гибкость при сборке переменных резисторов Поэтому при конструировании микроэлектронного оборудования целесообразно уменьшать количество переменных резисторов в схемах В большинстве случаев это может быть выполнено за счет использования относительно дорогих постоянных резисторов, имеющих очень малый разброс. Резисторы могут изготовляться несколькими способами. Выбор той или иной технологии определяется такими соображениями, как стоимость, разброс номиналов, стабильность при внешних воздействиях и т. п. Композиционные резисторы являются наиболее дешевыми, но имеют худшие допуски и обладают относительно плохой стабильностью при повышенных температурах. Металлопленочные и оловяннооксидные резисторы более стабильны и имеют меньший разброс.

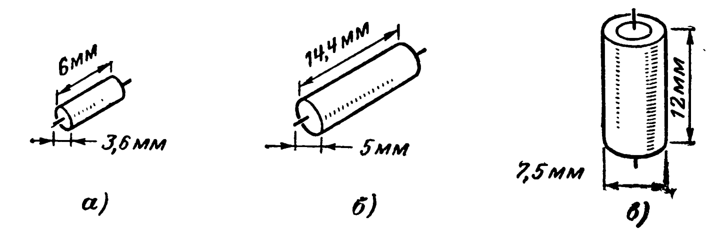


Рис. 4-8. Миниатюрные конденсаторы.

а — танталовый 5 мкФ; *б* — керамический 0,05 мкФ; *в* — воздушный 10 пФ.

Конденсаторы. На рис 4-8 сравниваются размеры и величины миниатюрных конденсаторов, полученных различными технологическими способами. Приведенные размеры являются минимальными при приемлемой стоимости. Танталовые конденсаторы дороже обычных электролитических конденсаторов, но гораздо меньше по объему и имеют лучшую стабильность в широком диапазоне температур. Керамические конденсаторы широко используются в качестве элементов связи на высоких частотах Если требуется повышенная стабильность при изменении температуры, то в качестве диэлектрика используются стекло или керамика с малой диэлектрической постоянной. Последнее приводит к увеличению размеров. Относительно большой объем, как показано на рис. 4-8, *в*, требуется для воздушного конденсатора, несмотря на то что при этом получаются номиналы около 10 пФ. В противоположность резисторам увеличение емкости переменных конденсаторов приводит к увеличению их геометрических размеров. Необходимость большого количества переменных конденсаторов в цепи резонансного усилителя ограничивает возможность его миниатюризации.

ВОПРОСЫ

1. **Размеры дискретного резистора определяется не его сопротивлением, а зависят от значения рассеиваемой . . . .**
2. . . . . , ... и . . . . . **резисторы имеют хорошую стабильность и малый разброс номиналов.**

3. . . . . **конденсаторы имеют большие номиналы и удовлетворительную стабильность.**
4. **Наиболее трудно поддаются миниатюризации те резисторы и конденсаторы, которые требуют . . . . после сборки схемы.**

ОТВЕТЫ

1. Размеры дискретного резистора определяются не его сопротивлением, а зависят от значения рассеиваемой **мощности.**
2. **Металлопленочные, оловянноокисные** и **проволочные** резисторы имеют хорошую стабильность и малый разброс номиналов.
3. **Танталовые** конденсаторы имеют большие номиналы и удовлетворительную стабильность.
4. Наиболее трудно поддаются миниатюризации те резисторы и конденсаторы, которые требуют **настройки** после сборки схемы.

Катушки индуктивности и трансформаторы. Структура катушки индуктивности показана на рис. 4-9. Индуктивный эффект возникает за счет магнитного потока, появляющегося при протекании тока через катушку. Значение индуктивности пропорционально числу вит-

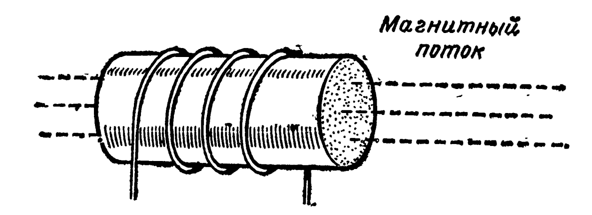


Рис. 4-9. Конструкция катушки индуктивности.

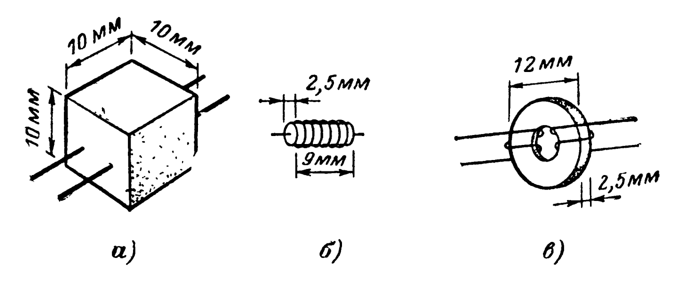


Рис. 4-10. Миниатюрные катушки индуктивности.

а — трансформатор звуковой частоты; *б* — высокочастотный дроссель; *в* — высокочастотный тороидальный трансформатор.

ков провода и значению индуцируемого магнитного потока. Значение магнитного потока при заданном числе ампер-витков определяется площадью поперечного сечения и значением магнитной проницаемости материала сердечника. Для получения больших плотностей пото-

ка используются материалы с высокой магнитной проницаемостью, такие как железо и ферриты. После выбора материала сердечника возможности увеличения индуктивности сводятся к увеличению числа витков или площади поперечного сечения катушки. На рис. 4-10 показаны размеры наиболее типичных миниатюрных трансформаторов и катушек индуктивности. Минимальные размеры трансформатора звуковой частоты сравнимы с размерами переменного резистора.

Транзисторы и диоды. Наиболее распространенными активными элементами в микроэлектронных системах являются транзисторы и

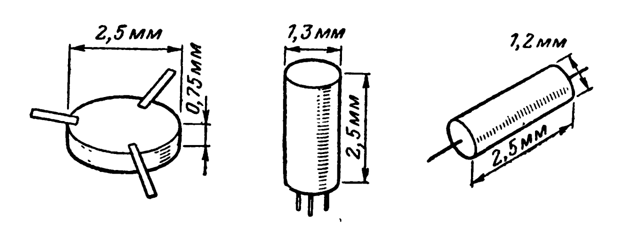


Рис. 4-11. Корпуса транзисторов и диода.

диоды. Успехи современной полупроводниковой технологии привели к тому, что размеры большинства транзисторов определяются не собственно прибором, а зависят от таких факторов, как возможность использования ручной сборки и защита от внешних воздействий. На рис. 4-11 приведены размеры корпусов некоторых миниатюрных транзисторов и диода. Если не требуется герметизация, то возможно дальнейшее уменьшение размеров. Эта проблема будет рассмотрена позже при анализе преимуществ тонких пленок.

ВОПРОСЫ

1. **Для получения больших значений индуктивностей необходимо использовать материалы с высокой магнитной проницаемостью и катушки с большим числом . . . .**
2. **В качестве активных приборов для микроэлектронных схем обычно используются полупроводниковые . . . . и . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Для получения больших значений индуктивностей необходимо использовать материалы с высокой магнитной проницаемостью и катушки с большим числом **витков.**
2. В качестве активных приборов для микроэлектронных схем обычно используются полупроводниковые **транзисторы и диоды.**

Реле и переключатели. Очень часто при выполнении электронных функций необходимо замыкание или размыкание определенных цепей системы при воздействии входного сигнала. На рис. 4-12 пока-

зано выполнение этой операции с помощью реле. Основными частями реле являются электромагнит и якорь, т. е. приводимый в движение пружинящий язычок. На якоре может находиться один или несколько контактов. Давление пружины держит эти контакты нормально разомкнутыми или нормально замкнутыми в зависимости от назначения реле. На рисунке контакт *A* показан нормально замкнутым, а контакт *B* нормально разомкнутым. Слово **нормально** относится к случаю отсутствия входного сигнала. При возбуждении электромагнита контакт *B* замыкается, а контакт *A* размыкается.

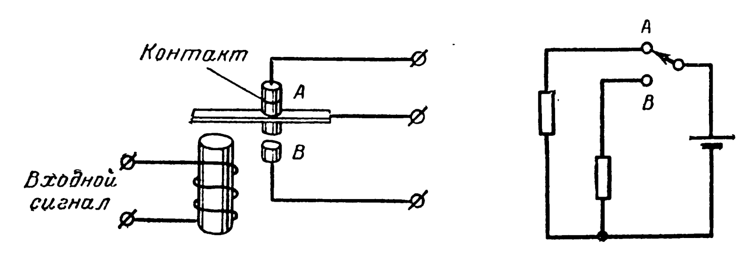


Рис. 4-12. Схема реле.

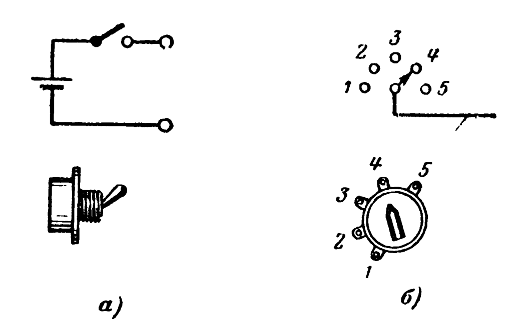


Рис. 4-13. Использование механических переключателей.

а — операция включения; *б* — операция переключения.

Так как на одном якоре могут располагаться несколько контактных пружин, то реле одновременно может коммутировать несколько цепей.

Вследствие того что переключение связано с механическим перемещением, использование реле ограничивается относительно низкими скоростями работы. Кроме того, разрушение со временем контакта приводит к плохой надежности По этим причинам реле в большинстве случаев, особенно в маломощных устройствах, было вытеснено электронными ключами на основе полупроводниковых приборов. Однако реле остается лучшим электронным переключателем в двух отношениях. Прежде всего в реле полностью отсутствует взаимосвязь между входом и выходом. И, во-вторых, последовательное сопротив-

ление замкнутого контакта гораздо меньше той величины, которая получается в электронных ключах. Поэтому в микроэлектронных схемах, работающих с током несколько сотен миллиампер, использование реле является необходимым. Типичное миниатюрное реле общего назначения, управляющее током до 2 А, занимает объем приблизительно 10×10×20 мм.

Механические переключатели обычно располагаются на лицевой панели устройства, для того чтобы оператор мог выполнять операции включения или переключения (рис. 4-13). При микроминиатюризации небольшого по объему электронного устройства механические переключатели могут занять большую часть объема всей системы. Минимальные размеры переключателей в этом случае определяются возможностью манипулировать ими с помощью человеческих пальцев. В больших электронных системах внешние переключатели занимают малую часть всего объема системы и уменьшение их размеров не столь важно.

ВОПРОСЫ

1. **Основными частями реле являются электромагнит и . . . .**
2. **Механические переключатели используются для выполнения функций . . . . и . . . .,**

ОТВЕТЫ

1 Основными частями реле являются электромагнит и **якорь.**
2. Механические переключатели используются для выполнения функций **включения** и **переключения.**

4-3. МЕЖЭЛЕМЕНТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И СВЯЗЬ МЕЖДУ ОТДЕЛЬНЫМИ СХЕМАМИ

Электронная система является не просто набором электронных элементов. Соединение отдельных элементов между собой является существенной частью работ при изготовлении и наладке системы. Общая стоимость системы и ее надежность в значительной мере определяются эффективностью способов соединений. На рис. 4-14 показана общая структура электронной системы.

Соотношение между отдельными элементами системы хорошо иллюстрируется на примере цифровой вычислительной машины. Подсистемы в такой системе включают в себя память, арифметическое устройство, источники питания и т. п. Эти подсистемы изготовляются путем соединения функциональных модулей. Модули в свою очередь представляют собой соединение отдельных элементов — транзисторов, резисторов, магнитных сердечников и конденсаторов.

Проблема выполнения соединений может быть разделена на две части. Первая — соединение исходных элементов и модулей в отдельные схемы. Вторая — обеспечение связи между этими схемами при соединении их в более сложные функциональные системы. На рис. 4-15 показано соединение элементов схемы на печатной плате для получения логического элемента. Крепление элементов осуществляется с помощью отверстий, просверленных в плате. Выводы встав-

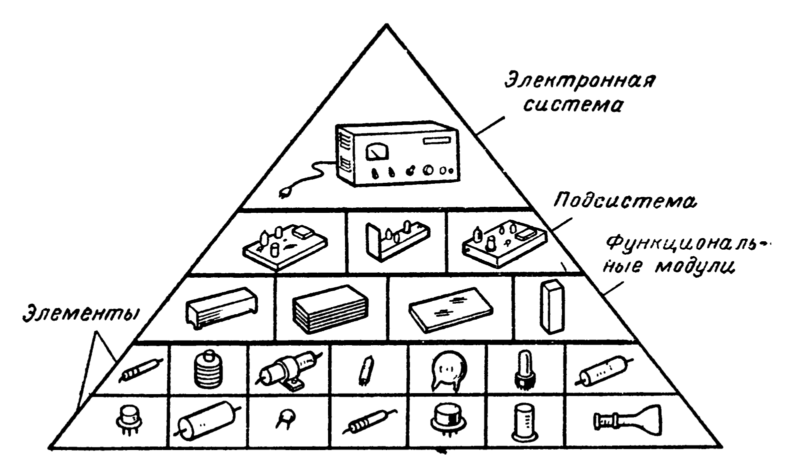


Рис. 4-14. Структура электронной системы.

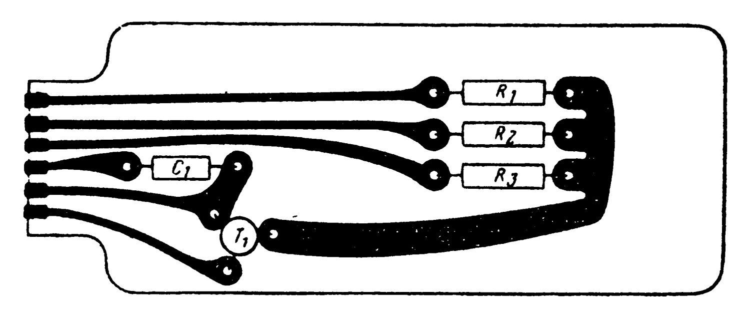


Рис. 4-15. Соединение элементов на печатной плате.

ляются в отверстия и затем припаиваются к металлизированным областям на плате. Металлические контакты в левом конце платы служат для обеспечения связи со следующей схемой, например, с помощью штепсельного разъема.

ВОПРОСЫ

1. **Эффективность способов соединений элементов является основным фактором в определении стоимости системы и ее . . . .**
2. **Сборка системы начинается с соединения исходных элементов в . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Эффективность способов соединений элементов является основным фактором в определении стоимости системы и ее **надежности.**

2. Сборка системы начинается с соединения исходных элементов в отдельные схемы.

Печатные платы. В большинстве случаев соединение дискретных элементов в микроэлектронные схемы осуществляется при помощи проводников на изолирующей подложке. Часть такой схемы показана на рис. 4-16. Элементы располагаются на стороне, противоположной металлизированной, а их выводы через специальные отверстия проходят через плату. Плата обрабатывается флюсом и погружается

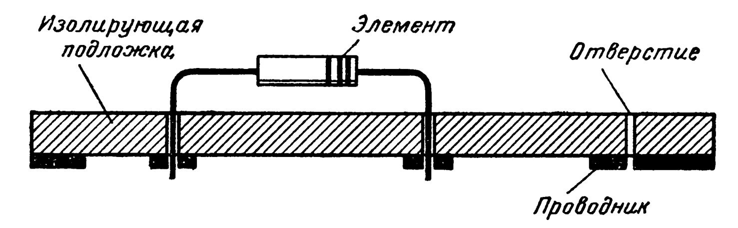


Рис. 4-16. Участок печатной платы.

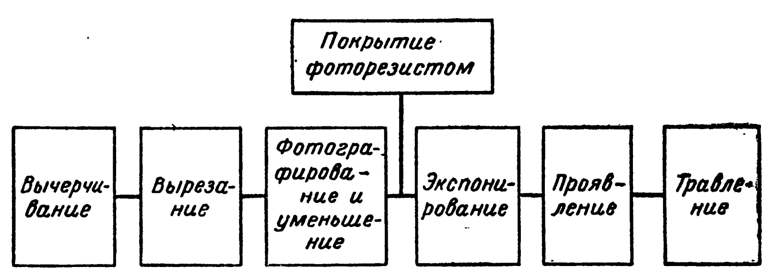


Рис. 4-17. Этапы изготовления печатной платы.

в ванночку с припоем, в результате чего одновременно получаются все электрические и механические соединения. Способ печатных плат особенно эффективен при работе с миниатюрными элементами, так как позволяет стандартизовать и упростить технику сборки. Элементы целесообразно подготавливать с короткими и жесткими выводами, чтобы облегчить соединение с платой. Ширина проводящих дорожек, составляющая десятую часть миллиметра, может обеспечить высокую плотность размещения проводников.

В качестве плат чаще всего используется пластик толщиной от 0,8 до 3 мм. Использование более тонких плат может привести к деформации и разрыву проводников. Выбор материала платы зависит от механических, электрических и химических условий, при которых будут проводиться сборка и последующая работа схемы. Наиболее распространенным материалом является слоистый пластик из стекловолокна или эпоксидной смолы. В качестве проводников применяется медь, покрытая золотом.

Изготовление печатных плат со специальной конфигурацией проводников достаточно сложно и занимает много времени. Основные этапы этого процесса показаны на рис. 4-17. Прежде всего рисунок

вычерчивают в масштабе, в несколько раз превышающем действительные размеры схемы. Затем, используя увеличенный чертеж в качестве образца, нужный рисунок вырезают на специальном красном пластике После этого рисунок фотографируют и уменьшают в соответствующее количество раз, в результате чего получается стеклянный негатив нужной конфигурации. Металлизированная сторона печатной платы покрывается фоторезистом, который представляет собой фоточувствительный противокислотный лак. Резист экспонируется через негатив. После проявления ненужные части металлизированного слоя открываются. Затем проводится удаление лишнего металла путем травления, снимается оставшийся лак и просверливаются отверстия в плате. Продолжительность и сложность всего процесса требуют использования высококачественных материалов и высокой культуры производства. Все это должно сочетаться с экономичностью продукции.

ВОПРОСЫ

1. **Использование печатных плат позволяет стандартизовать и упростить . . . .**
2. **Малая ширина линий на печатной плате позволяет получить высокую плотность размещения . . . .**
3. **Высококачественные печатные платы преставляют собой тонкие пластинки эпоксидного материала, покрытые . . . .**
4. **Процесс изготовления печатных плат требует использования комбинации химических, механических и . . . . операций.**

ОТВЕТЫ

1. Использование печатных плат позволяет стандартизовать и упростить **технику сборки.**
2. Малая ширина линий на печатной плате позволяет получить высокую плотность размещения **проводников.**
3. Высококачественые печатные платы представляют собой тонкие пластинки эпоксидного материала, покрытые **медью.**
4. Процесс изготовления печатных плат требует использования комбинации химических, механических и **фотографических** операций.

Плотность упаковки. Использование субминиатюрных элементов позволяет размещать многие из них на поверхности печатной платы. В случае применения метода погружения в припой выводы элементов проходят через плату и припаиваются к ее металлизированным частям. Диаметр выводов обычных миниатюрных элементов лежит в интервале от 0,4 до 0,8 мм. Поэтому в плате должны быть просверлены отверстия несколько большего диаметра. На рис. 4-18 показаны относительные размеры проводников и мест на плате, где происходит присоединение выводов элементов. Из рисунка видно, что большую часть поверхности платы занимают отверстия и металлизированные островки около них для обеспечения надежного соединения после припаивания. Минимальное расстояние между выводами элементов должно быть не менее 3 мм, что существенно больше размеров самих выводов. Использование очень тщательного контроля операций и установление жестких ограничений на разброс параметров позволяют уменьшить приведенные геометрические размеры примерно в два

раза. Однако это, как правило, приводит к усложнению сборки, увеличению стоимости и уменьшению надежности соединений. Один из путей повышения плотности упаковки состоит в использовании элементов с плоскими узкими выводами. Эти выводы, имеющие ширину 0,25—0,5 мм и толщину около 0,12 мм, могут привариваться к металлизированной поверхности, как показано на рис. 4-19. Так как точ-

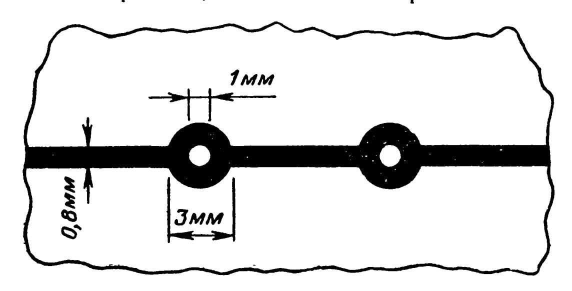


Рис. 4-18. Металлизация вокруг места соединения вывода.

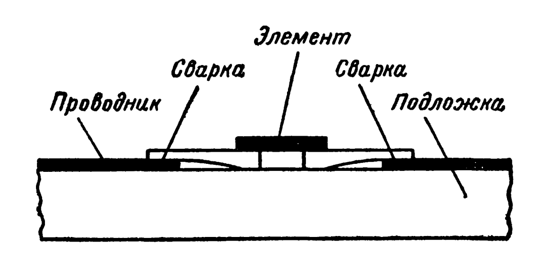


Рис. 4-19. Соединение элементов с плоскими выводами.

ность сварки существенно выше точности получения соединений методом погружения в припой и нет нужды в отверстиях на плате, то пространство около места присоединения вывода в этом случае может достигать 1,2 мм. К недостаткам этого метода следует отнести потребность в специальном оборудовании для микросварки, получение контактов не одновременно, как в случае ванночки с припоем, а последовательно один за другим, возможность локального перегрева и выхода из строя элементов или части платы вблизи места сварки. Последнее связано с тем, что температура припоя существенно ниже температуры, необходимой для получения сварного соединения металла с металлом. Постоянное улучшение автоматического оборудования для микросварки делает технику сварки более надежной.

ВОПРОСЫ

1. **Основная часть поверхности печатной платы отводится для отверстий и металлизированных островков, обеспечивающих надежность . . . .**

2. **Плотность упаковки может быть увеличена путем использования элементов с плоскими выводами и соединением их способом . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Основная часть поверхности печатной платы отводится для отверстий и металлизированных островков, обеспечивающих надежность **паяных соединений.**
2. Плотность упаковки может быть увеличена путем использования элементов с плоскими выводами и соединением их способом **сварки.**

Многослойные платы. Другая возможность увеличения плотности упаковки на печатной плате при использовании метода погружения в припой состоит в получении межэлементных соединений на верхней

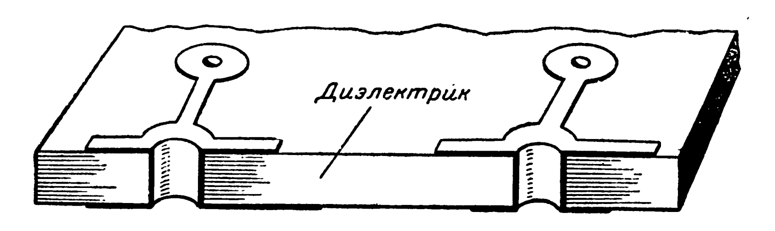


Рис. 4-20. Двусторонняя печатная плата.

и нижней поверхностях платы. Структура двусторонней печатной платы показана на рис. 4-20. Этот тип плат изготовляется путем первоначальной металлизации обеих поверхностей и просверливанием необходимых отверстий. Процесс получения рисунка соединений между элементами аналогичен операциям при обработке однослойной печатной платы. Главное отличие состоит в использовании различных фотографических масок для верхней и нижней плоскостей. Особое внимание при этом должно быть уделено экспонированию для получения точного совмещения рисунков на обеих сторонах платы (совмещение означает, что рисунок на каждой поверхности должен точно соответствовать отверстиям на плате и рисунку на противоположной стороне платы). Использование обеих поверхностей платы для получения соединений позволяет более просто решать задачу взаимных пересечений в схеме и уменьшает пространство между соседними отверстиями. Двусторонние печатные платы часто применяются для высокочастотных схем. В этом случае металлизированная нижняя поверхность используется как эффективное заземление, уменьшающее электростатическую связь между соседними платами.

На рис. 4-21 показано поперечное сечение многослойной печатной платы. Эти платы, число проводящих слоев в которых может достигать 15, позволяют соединять большое число элементов в минимальном объеме. Однако изготовление многослойной платы не может быть выполнено простым повторением технологии изготовления двусторонней печатной схемы. Многослойная структура изготовляется способом формирования проводящего рисунка на каждой плате с по-

следующим соединением отдельных плат вместе. Проблема точности совмещения при наслоении плат может стать столь же острой, как и для фотографических операций. Толщина отдельных плат, используемых в многослойных структурах, меньше толщины обычных плат и лежит в пределах от 100 до 300 мкм. Проводники в этом случае могут быть уже 125 мкм. После сборки многослойной платы проводится просверливание дырок и соединение отдельных слоев с помощью металлизации внутренних отверстий. Толщина металлизированного слоя составляет 25—50 мкм. Это означает, что надежные соединения должны быть получены на металлических участках около 50 мкм. Вследствие сложности и хрупкости многослойные печатные платы очень дороги. Обнаружение дефекта до окончательной сборки элементов представляет собой трудную задачу, а ремонт плат практически невозможен. Однако имеется несколько несомненных достоинств при использовании многослойных плат в микроэлектронике. К ним относятся увеличение гибкости выполнения соединений, уменьшение ограничений на размещение элементов, увеличение плотности расположения проводников и лучшие электрические характеристики системы в целом.

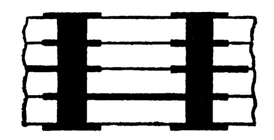


Рис. 4-21. Многослойная печатная плата.

ВОПРОСЫ

1. **Главная проблема при изготовлении многослойных печатных плат состоит в получении точного . . . .**
2. **Наиболее трудной операцией при производстве многослойных печатных плат является процесс металлизации внутренних сторон . . . .**
3. **Преимущества многослойных печатных плат состоят в увеличении . . . . расположения проводников, улучшении гибкости при . . . . элементов и . . . . электрических характеристик.**

ОТВЕТЫ

1. Главная проблема при изготовлении многослойных печатных плат состоит в получении точного **совмещения.**
2. Наиболее трудной операцией при производстве многослойных печатных плат является процесс металлизации внутренних сторон **просверленных отверстий.**
3. Преимущества многослойных печатных плат состоят в увеличении **плотности** расположения проводников, улучшении гибкости при **размещении** элементов и **улучшении** электрических характеристик.

Соединения на высоком функциональном уровне. Рассмотрение свойств печатных плат показывает, что теоретически возможно размещение целой электронной системы на одной плате. На практике это никогда не достигается. По мере увеличения размеров становится более вероятным, что какой-нибудь элемент системы во время работы потребует модификации или замены, а детальный анализ больших

систем становится очень трудным и дорогим. Поэтому на простых печатных платах обычно располагаются схемы, по своей сложности редко превышающие простую усилительную цепочку или сдвиговый регистр. Более высокий функциональный уровень достигается путем

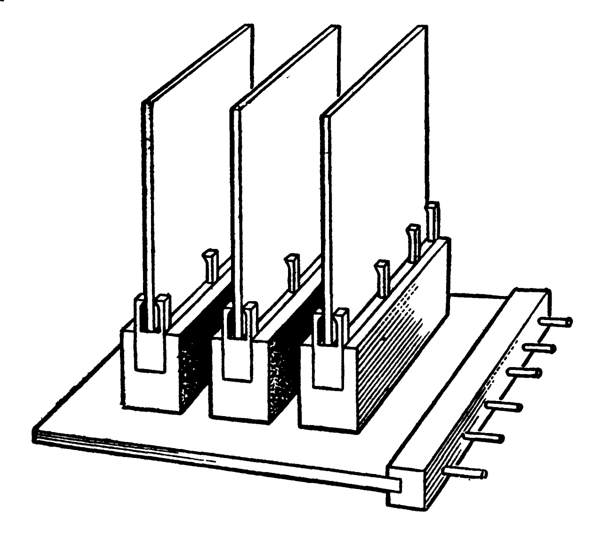


Рис. 4-22. Соединение отдельных печатных плат.

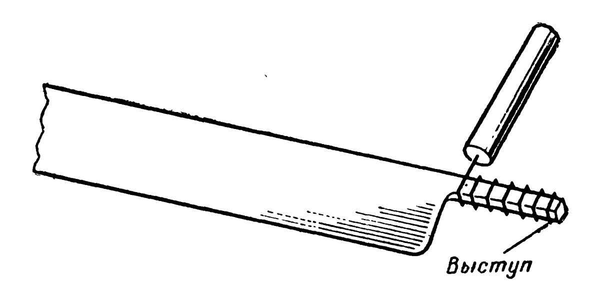


Рис. 4-23. Способ скручивания провода.

использования штепсельных разъемов. На рис. 4-22 показано, как печатные платы могут быть объединены для выполнения одной сложной функции. Отдельные платы вставляются в разъемы на общей плате. Печатный монтаж общей платы обеспечивает получение более сложной функции путем соответствующего соединения отдельных плат.

На рис. 4-23 иллюстрируется способ скручивания провода. Поперечное сечение выступа представляет собой прямоугольник, и так как провод скручивается в напряженном состоянии, то грани выступа

врезаются в провод, исключая возможность соскальзывания и обеспечивая получение хорошего контакта. Способ скручивания провода приводит к утяжелению конструкции, так как размер выступа составляет 12—16 мм. Однако в этом случае не встречаются такие проблемы, как нагрев, обработка флюсом и разбрызгивание припоя.

ВОПРОСЫ

1. **Необходимость модификации или замены элементов ограничивает . . . . схемы, которую целесообразно размещать на отдельной плате.**
2. **Для получения сложных функций печатные схемы объединяются на . . . . плате.**
3. **Способ скручивания провода имеет преимущество по сравнению со способами пайки или сварки, так как не требует**

ОТВЕТЫ

1. Необходимость модификации или замены элементов ограничивает **сложность** схемы, которую целесообразно размещать на отдельной плате.
2. Для получения сложных функций печатные схемы объединяются на **общей** плате.
3. Способ скручивания провода имеет преимущество по сравнению со способами пайки или сварки, так как не требует **нагрева.**

4-4. ОБЪЕМНЫЕ МОДУЛИ

В первой части данной главы рассмотрены параметры отдельных элементов и способы изготовления миниатюрных электронных систем Ниже будут обсуждены вопросы, связанные с применением дискретных элементов в схемах.

Сборка элементов произвольной геометрии. Наиболее простой путь миниатюризации оборудования заключается в разбиении системы на элементарные схемные функции и уменьшении размеров, требующихся на выполнение каждой из них. Например, миниатюризация усилителей в системе может быть проведена путем использования микроэлементов и сборкой их в наименьшем объеме. Сборка может потребовать квалифицированного выполнения паяных соединений или специального оборудования для микросварки. Различные схемы требуют разного числа элементов, отличающихся своими размерами, и поэтому для каждой схемы отдельно должна быть определена ее оптимальная конфигурация. После сборки схемы целесообразно герметизировать в корпус, в результате чего получаются модули, показанные на рис. 4-24. Стенки корпуса предохраняют близко расположенные провода от соприкосновения Кроме того, корпус обеспечивает стандартизацию форм различных схемных модулей. Последнее упрощает соединение модулей в систему.

«Штабельные» модули. Сборка компонентов произвольной формы для миниатюризации схем имеет преимущества с точки зрения гибкости, но требует разработки новых способов и ручных приспособлений для каждой схемы. Другой, также достаточно простой спо-

соб основывается на том, что почти все дискретные электронные элементы могут быть выполнены в виде цилиндра с осевым расположением выводов. Такие элементы позволяют осуществлять их сборку способом параллельного расположения, как показано на рис. 4-25. Выводы могут припаиваться к соединительной плоскости, расположенной перпендикулярно к оси элементов. Концы выводов для их соединения в системе выносятся за край плоскости, а оставшаяся часть герметизируется. Модификация «штабельного» объединения элементов заключается в предварительном изготовлении отверстий

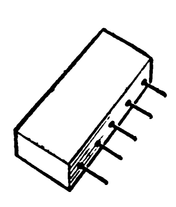
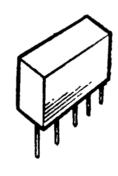



Рис. 4-24. Объемные модули.

Рис. 4-25. «Штабельный» модуль.

в алюминиевых или пластиковых пластинках для облегчения размещения элементов. Подобные модули могут собираться при помощи пайки или сварки. Как и в случае сборки элементов произвольной геометрии, при «штабельном» объединении в конечном счете получаются твердые конструкции различных исходных элементов. Если модули предназначаются для работы в широком диапазоне температур, то должно быть предусмотрено влияние механических напряжений, возникающих в местах соединений при изменении температуры.

ВОПРОСЫ

1. **Недостаток модулей, собранных из произвольных элементов, состоит в том, что для каждой схемы должна решаться индивидуальная проблема выполнения . . . .**
2. **«Штабельная» сборка использует возможность изготовления всех элементов в виде . . . .**
3. **Герметизация в корпусе защищает собранную схему от механических воздействий и обеспечивает стандартизацию . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Недостаток модулей, собранных из произвольных элементов, состоит в том, что для каждой схемы должна решаться индивидуальная проблема выполнения **соединений.**
2. «Штабельная» сборка использует возможность изготовления всех элементов в виде **цилиндра.**
3. Герметизация в корпусе защищает собранную схему от механических воздействий и обеспечивает стандартизацию **внешней формы.**

Сборка унифицированных элементов. Сборка и соединение элементов в модули могут быть существенно облегчены, если все элементы имеют одинаковые размеры и формы, т. е. унифицированы. Очевидным недостатком такого способа является то, что все элементы должны иметь размеры и формы самого большого из элементов. Диод должен занимать тот же объем, что и трансформатор. Тем не менее, по мере того как элементы становятся все меньше и меньше, плотность монтажа системы начинает определяться не размером элементов, а соединениями между ними. Поэтому в условиях не-

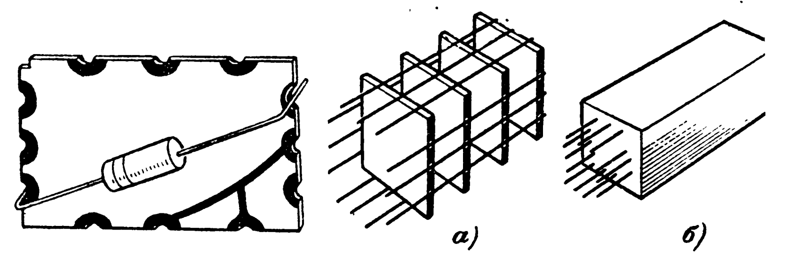


Рис. 4-26. Микромодульная плата.

Рис. 4-27. Сборка микромодуля.
а — соединение плат; *б* — внешний вид модуля.

прерывного прогресса миниатюризации роль сборки унифицированных элементов возрастает.

Микромодульные системы — это системы, получаемые при сборке отдельных унифицированных частей. Элементарной ячейкой таких систем является микромодульная плата. Отдельная плата представляет собой керамическую пластину толщиной примерно 250 мкм и площадью около 8×8 мм² (рис. 4-26). Двенадцать пазов по 400 мкм глубиной каждый расположены по периметру платы. Отдельный дискретный элемент, такой как миниатюрный резистор, располагается на поверхности платы, а его выводы соединяются с соответствующими пазами. Пазы могут соединяться один с другим путем металлизации по керамике. На рис. 4-27 показана сборка микромодулей. Металлические стержни, припаянные или приваренные к пазам, выполняют двойную функцию — механического крепления и электрического соединения. В окончательном виде модуль представляет собой параллелепипед сечением 9×9 мм² и длиной от 10 до 20 мм. Возможные изменения в длине связаны с использованием в схемах различного числа и вида элементов. Самым широким элементом является тороидальная катушка.

Микромодули позволили на порядок уменьшить объем специального электронного оборудования. Это было сделано одновременно с повышением его надежности. Ограничения микромодульного способа связаны с трудностями в получении большого количества специально разработанных для этого элементов, стоимость которых не должна быть выше стоимости обычных дискретных элементов.

ВОПРОСЫ

1. **По мере уменьшения размеров элементов плотность монтажа в электронной системе начинает определяться главным образом . . . . , а не размерами самих элементов.**

2. **В микромодульных системах дискретные элементы располагаются на керамических платах, имеющих стандартные . . . . размеры.**
3. **Микромодульные схемы собираются с помощью . . . ., расположенных по краям отдельных плат.**

ОТВЕТЫ

1. По мере уменьшения размеров элементов плотность монтажа в электронной системе начинает определяться главным образом **межэлементными соединениями,** а не размерами самих элементов.
2. В микромодульных системах дискретные элементы располагаются на керамических платах, имеющих стандартные **поперечные** размеры.
3. Микромодульные схемы собираются с помощью **металлических стержней,** расположенных по краям отдельных плат.

4-5. ПЛОСКИЕ МОДУЛИ

Сборка элементов произвольной геометрии. Высокая плотность упаковки элементов, которая может быть достигнута при использовании печатных плат, зависит от общей толщины собранной на плате схемы и свободного пространства между соседними платами для обеспечения электрической изоляции и отвода тепла. В случае сборки элементов произвольной формы плотность монтажа может быть увеличена с помощью использования плоских модулей. На рис. 4-28 показана эта возможность. Значительный выигрыш получается в результате размещения всех элементов и соединительных проводов на одной стороне подложки. Отсутствие металлизации на нижней стороне платы делает возможным плотное присоединение одной платы к другой без опасности короткого замыкания. Общая высота платы уменьшается при использовании плоских элементов. Транзисторы, показанные на рисунке, имеют толщину около 2,5 мм. Присоединяются транзисторы к схеме с помощью узких соединительных полосок. Для уменьшения площади, занимаемой схемой на плате, могут использоваться элементы с короткими выводами или элементы без выводов, имеющие специальные контактные площадки для припаивания. В качестве подложки очень часто используется металлизированная керамика, которая может выдерживать высокие температуры и сохранять достаточную прочность при толщине менее 250 мкм. Выигрыш, получаемый при уменьшении толщины платы за счет использования одной ее стороны, приводит к усложнению процесса сборки. В данном случае необходимо использовать более сложные зажимные приспособления в процессе получения паяного соединения, так как элементы не имеют определенного фиксированного по-

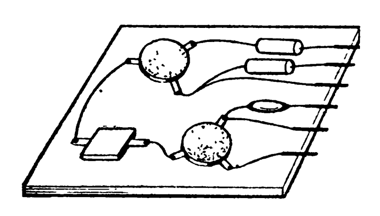


Рис. 4-28. Плоский модуль.

ложения на плате. Тепло, выделяемое при соединении близко расположенных элементов, может привести к ухудшению их характеристик На рис. 4-29 показано соединение прибора с плоскими выводами к поверхности платы при помощи сварки. Приваривание плоского вывода к проводнику на плате происходит с помощью двух параллельных электродов, через которые пропускается ток. При таком способе сварки выделяется небольшое количество тепла, поэтому его можно успешно использовать не только для получения соединений

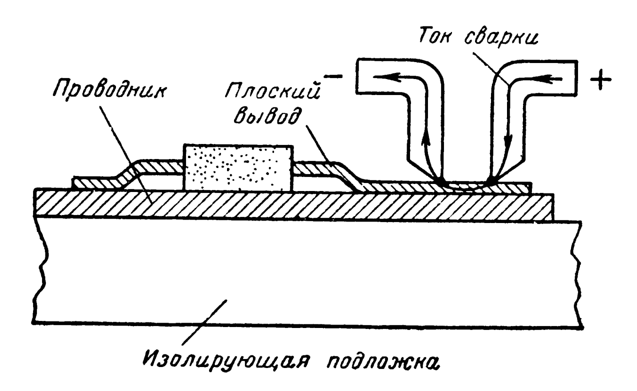


Рис. 4-29. Сварка при помощи параллельных электродов.

при сборке, но также и при замене элементов и ремонте схемы. Для получения большой плотности упаковки могут использоваться лазеры и электронно-лучевая технология.

ВОПРОСЫ

1. **Использование плоских модулей позволяет увеличить плотность упаковки благодаря уменьшению .... платы и .... между платами.**
2. **Широкое использование металлизированной керамики в качестве подложки объясняется ее ...., небольшой .... и стойкостью к ....**
3. **Техника сварки при помощи параллельных электродов используется для присоединения элементов к .... печатной платы.**

ОТВЕТЫ

1. Использование плоских модулей позволяет увеличить плотность упаковки благодаря уменьшению **толщины** платы **и расстояния** между платами.
2. Широкое использование металлизированной керамики в качестве подложки объясняется ее **прочностью,** небольшой **толщиной** и стойкостью к **температуре.**

3. Техника сварки при помощи параллельных электродов используется для присоединения элементов к поверхности печатной платы.

Сборка унифицированных элементов. Использование элементов с упорядоченной геометрией в плоских модулях носит название метода таблеток. Он основывается на использовании семейства элементов одинаковой толщины (рис. 4-30). Транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности получаются в виде плоских цилиндров с металлизированными контактными площадками на верхней и нижней поверхностях. Элементы могут иметь различный диаметр, но все должны быть одинаковой толщины Стандартная толщина таблетки составляет 1,5 мм, но может быть уменьшена до 0,8 мм. В тех местах, где должны быть расположены таблетки, на поверхности подложки просверливаются углубления. Таблетки-элементы вставляются в эти углубления и чаще всего приклеиваются к плате с помощью эпоксидной смолы (рис. 4-31). Соединения между различными элементами могут быть получены несколькими способами. Один из них состоит в сплавлении нижних и верхних поверхностей таблеток с металлической соединительной рамкой соответствующей формы. В простых системах проводники предварительно наносятся на верхнюю и нижнюю поверхности, а затем таблетки с помощью проводящего материала присоединяются к этим проводникам. Другой способ заключается в закреплении таблеток на неметаллизированной подложке, после чего обе стороны платы покрываются медью. Используя фотогравировку, удаляют медь с нежелательных мест и тем самым получают соединеие таблеток друг с другом путем изготовления контактных площадок и соединительных проводников.

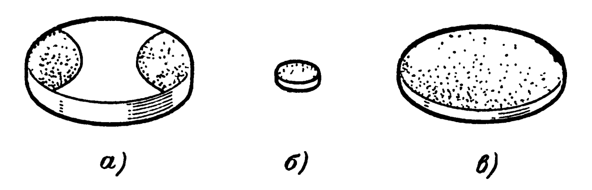


Рис. 4-30. Элементы-таблетки.
а — транзистор; *б* — диод; *в* — резистор.

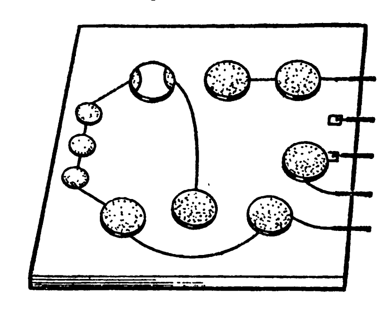


Рис. 4-31. Метод таблеток.

Как и в случае объемных модулей, при использовании элементов с унифицированной геометрией метод плоских таблеток является весьма эффективным в уменьшении объема электронных систем. Од-

нако в связи с тем что подавляющее количество элементов изготовляется без стандартизации геометрии, некоторые преимущества дискретных элементов, такие как стоимость, доступность и надежность, могут быть утрачены.

Соединение модулей. Схемы, созданные на основе объемных и плоских модулей, могут объединяться на общих платах. Сложные модульные схемы имеют большое количество соединений и используют много различных материалов. При изменении температуры различие в температурных коэффициентах линейного расширения приводит к возникновению механических напряжений в местах соединения различных материалов. Для повышения надежности системы должны быть приняты меры, уменьшающие эти напряжения.

ВОПРОС

Системы, построенные методом таблеток, состоят из элементов стандартной . . . .

ОТВЕТ

Системы, построенные методом таблеток, состоят из элементов стандартной **толщины.**

4-6. ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ

Успехи полупроводниковой и тонкопленочной технологии за последние несколько лет привели к существенному улучшению качества и объема выпуска элементов, которые могут быть использованы в микроэлектронике. Техника тонких пленок может использоваться

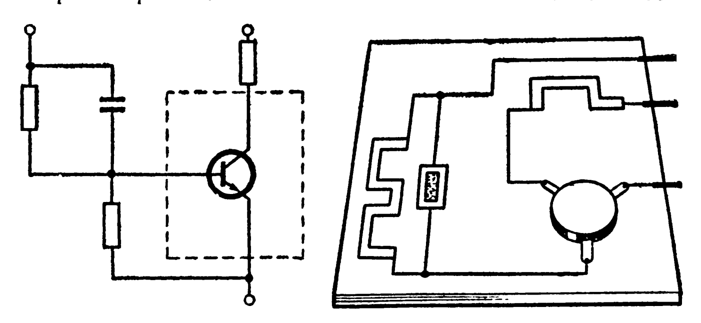


Рис. 4-32. Схема инвертора.

для изготовления резисторов и конденсаторов, с помощью полупроводниковой технологии могут быть получены транзисторы, диоды и компактные резисторы. Конечно, основные преимущества дискретных элементов по мере развития интегральной электроники будут сокращаться. Однако потребуется еще некоторое время, пока все достоинства использования дискретных элементов исчезнут. Поэтому лучший способ миниатюризации электронного оборудования состоит в исполь-

зовании тех методов, которые совместимы с традиционной техникой дискретных элементов.

На рис. 4-32 показан пример совместного использования тонких пленок и дискретного транзистора. Изображенная схема представляет собой простейший инвертор, используемый в цифровых системах. Резисторы и конденсатор изготовлены на керамической подложке размером менее 12×12 мм² методом тонкопленочной технологии. После добавления транзистора в миниатюрном корпусе гибридный инвертор представляет собой высокодобротную схему в небольшом объеме.

Оптимальное проектирование любой электронной системы приводит к использованию минимального количества модулей. Это упрощает проблему запасных частей и обучение обслуживающего персонала. Однако успешное использование модулей в схемах различного применения возможно при разработке достаточно универсальных и, следовательно, дорогих модулей. Поэтому наиболее разумный путь состоит в выборе таких «элементарных» схем, которые могли бы быть изготовлены доступными технологическими методами. В этом случае конструктор системы имеет ограниченное число различных модулей и для выполнения некоторых нестандартных функций должен искать другие пути. Наиболее рациональный путь при этом состоит в использовании дискретных элементов. На рис. 4-33 показано применение обычных элементов в сочетании с объемными модулями. Это позволяет конструктору включать в схему такие элементы, как переменные резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы больших номиналов и даже мощные транзисторы, одновременно получая реализацию всех достоинств микросхем.

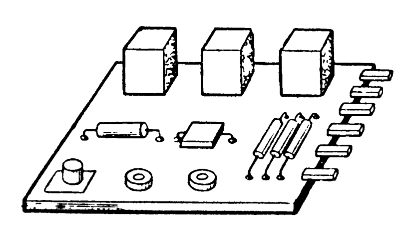


Рис. 4-33. Объемная гибридная схема.

ВОПРОСЫ

1. **Использование дискретных элементов при микроминиатюризации электронного оборудования имеет ряд достоинств по сравнению с использованием полупроводниковых и тонкопленочных интегральных схем.**

   Некоторые из преимуществ дискретных элементов состоят в их высокой . . . . , простоте решения вопросов . . . . и возможности получения уникальных . . . .

2. **Дискретные элементы — это активные и пассивные приборы.**

   а) **К активным относятся приборы, которые позволяют получать усиление мощности, т. е. . . . . и . . . .**

   б) **Пассивные элементы — это . . . . , ... и . . . .**

   в) **Изготовление печатного монтажа основывается на использовании . . . . процесса травления.**

ОТВЕТЫ

1. Некоторые из преимуществ дискретных элементов состоят в их высокой надежности, простоте решения вопросов снабжения и возможности получения уникальных электрических характеристик.
2. *а*) К активным относятся приборы, которые позволяют получать усиление мощности, т. е. вакуумные лампы и транзисторы.

   б) Пассивные элементы — это резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности.

   в) Изготовление печатного монтажа основывается на использовании фотохимического процесса травления.

Глава пятая

ТЕХНИКА ТОНКИХ ПЛЕНОК

С чем Вы познакомитесь в этой главе. В предыдущей главе было описано использование металлизации на поверхности платы для соединения объемных элементов. Техника печатного монтажа внесла существенный вклад в миниатюризацию оборудования. В данной главе описано расширение возможностей тонкопленочной технологии для создания самих элементов, а не только для их соединения. Пассивные элементы, такие как резисторы и конденсаторы, а также некоторые активные приборы, могут изготовляться на основе слоев с толщиной менее 0,001 см. В главе описаны некоторые технологические возможности получения тонких пленок. Проведен обзор используемых материалов и рассмотрены их электрические и физические свойства. Описаны типичные тонкопленочные элементы и способы их соединения для выполнения схемных функций. Рассмотрены уникальные свойства полупроводниковых пленок и проведено их сравнение с металлическими. Свойства магнитных пленок будут описаны применительно к использованию в микроминиатюрных устройствах памяти. И, наконец, рассмотрено явление сверхпроводимости в некоторых тонких пленках и описан способ получения криогенных схем.

5-1. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Техника тонких пленок основывается на использовании слоев металлов диэлектриков или полупроводников толщиной от 10 до 1000 нм. Нанометр (нм) — одна миллиардная часть метра. Как видно из рис. 5-1, диаметр атома лежит в диапазоне 0,1—0,2 нм. Поэтому тонкопленочная технология часто имеет дело с материалами толщиной всего в несколько сотен атомных слоев. При такой толщине свойства материалов часто отличаются от их обычных свойств. Электрические свойства пленок зависят также от природы материала подложек и технологии изготовления пленок.

Вакуумное испарение. Технология вакуумного испарения заключается в осаждении «кипящего» материала на подложку. Испарение

или «кипение» материала происходит тогда, когда его собственное давление парообразования превышает внешнее давление. Нормальное атмосферное давление составляет 760 мм рт. ст. При нагревании воды до 100° С ее давление парообразования превышает эту величину, в результате чего образуется газ (пар). При нормальной температуре давление парообразования твердых тел, применяемых для изготовления тонких пленок, очень мало. В вакуумных испаряющих системах достигается одновременное увеличение давления парообразования за счет подогревания испаряющегося материала и уменьшения окружающего давления. На рис. 5-2 показаны основные элементы установки вакуумного испарения. Колпак и плоские основания образуют камеру низкого давления, связанную с вакуумной системой. Испаряемый материал подогревается в специальной чашечке, сделанной из тугоплавкого материала, такого как платина или вольфрам. Подогрев чашечки осуществляется электрическим способом. Давление парообразования испарителя при нагревании увеличивается до 10^{-2} мм рт. ст. Окружающее давление в камере уменьшается до 10^{-5} мм рт. ст. Такое низкое окружающее давление необходимо для обеспечения испарения и удаления моле-

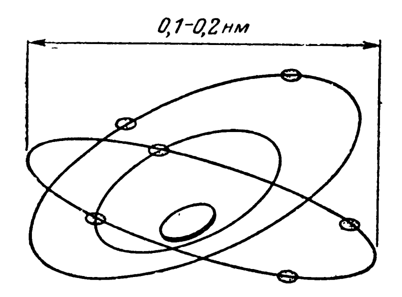


Рис. 5-1. Диаметр атома.

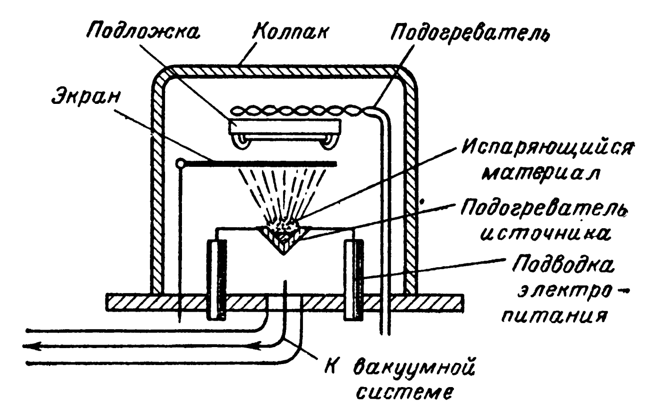


Рис. 5-2. Система вакуумного испарения.

кул газа из пространства между испаряющимся материалом и подложкой. Если посторонние молекулы не удалены, то они сталкиваются с молекулами испаряемого материала и затрудняют образование чистого, однородного и плотного слоя на подложке. Между испарителем и подложкой часто ставится экран. Примеси и загрязнения на поверхности материала источника будут испаряться в первую оче-

редь. Экран используется для предотвращения попадания загрязнений на подложку. Через некоторое время после начала испарения экран отводится в сторону.

Для образования пленки очень важно, чтобы молекулы, достигающие подложки, плотно с ней соединялись. По этой причине очистка поверхности подложки является важным этапом всего технологического процесса. Это выполняется с помощью подогрева подложки во время испарения для удаления любых поверхностных загрязнений или слоев газа, которые могут примешиваться к выращиваемой пленке.

ВОПРОСЫ

1. **В тонкопленочиых электронных элементах используются слои толщиной от . . . . до . . . . нм.**
2. **Типичные размеры атомов лежат в интервале от . . . . . . до . . . . нм.**
3. **Низкое давление в камере необходимо для получения испарения и обеспечения беспрепятственного прохождения молекул от . . . . к . . . .**

ОТВЕТЫ

1. В тонкопленочных электронных элементах используются слои толщиной от **10** до **1000** нм.
2. Типичные размеры атомов лежат в интервале от **0,1** до **0,2** нм.
3. Низкое давление в камере необходимо для получения испарения и обеспечения беспрепятственного прохождения молекул от **испарителя к подложке.**

На практике используется большое количество модификаций описанной выше испаряющей системы Испарение может идти вверх или вниз. Возможно использование нескольких испарителей для по-

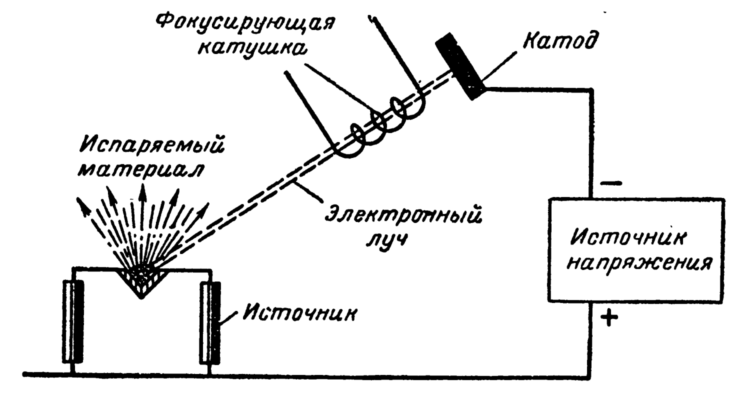


Рис. 5-3. Нагрев электронным лучом.

следовательного или одновременного осаждения различных материалов. На рис. 5-3 показано использование электронного луча для нагревания испаряемого материала. Катод и система отклонения электронного луча в этом случае располагаются вне колпака. При приложении большого напряжения между катодом и источником электроны за время пролета до источника приобретают энергию, достаточную для его испарения. Важная особенность этого способа заключается в том, что нагревается только часть материала, на которую непосредственно падает электронный луч. Это позволяет в качестве чашечки для испарителя использовать сам испаряющийся материал. Последнее особенно важно для тугоплавких материалов, так как при их испарении возникают трудности с подбором соответ-

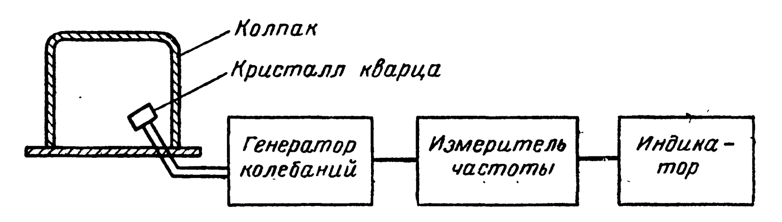


Рис. 5-4. Контроль толщины пленки.

ствующего держателя. Использование электронного луча весьма эффективно для получения чистых пленок, так как при этом нагревается только требуемый материал, а все посторонние примеси находятся при окружающей температуре.

Весьма важным является измерение толщины осаждаемой пленки в процессе испарения. В случае осаждения металлической пленки для точного определения и контроля ее окончательной толщины измеряют сопротивление между двумя электрическими контактами на изоляторе. По мере осаждения на подложку пленки сопротивление между контактами будет меняться, т. е. измерение сопротивления дает информацию об изменении ее толщины. Более сложная система контроля показана на рис. 5-4. Кристалл кварца определяет частоту колебаний генератора. По мере осаждения материала на поверхность кристалла частота кварца будет уменьшаться. Изменение частоты может быть выделено и получена связь этого изменения с толщиной пленки. Основное преимущество этой системы заключается в возможности определения толщины очень тонких пленок.

ВОПРОСЫ

1. **Типичное значение окружающего давления для вакуумного испарения составляет . . . . мм рт. ст.**
2. **Улучшение чистоты осаждаемой пленки достигается использованием . . . . между испарителем и подложкой.**
3. **Подогрев подложки улучшает сцепление пленки благодаря удалению с поверхности примесей и слоев . . . .**
4. **Получение пленок тугоплавких материалов становится возможным при использовании нагрева с помощью . . . .**

5. **Контроль толщины пленки во время осаждения может осуществляться с помощью измерения частоты кварцевого** . . . .

ОТВЕТЫ

1. Типичное значение окружающего давления для вакуумного испарения составляет 10^{-5} мм рт. ст.
2. Улучшение чистоты осаждаемой пленки достигается использованием **экрана** между испарителем и подложкой.
3. Подогрев подложки улучшает сцепление пленки благодаря удалению с поверхности примесей и слоев **газа.**
4. Получение пленок тугоплавких материалов становится возможным при использовании нагрева с помощью **электронного луча.**
5. Контроль толщины пленки во время осаждения может осуществляться с помощью измерения частоты кварцевого **генератора.**

Применение вакуумного испарения. Метод вакуумного испарения широко используется для изготовления электронных тонкопле-

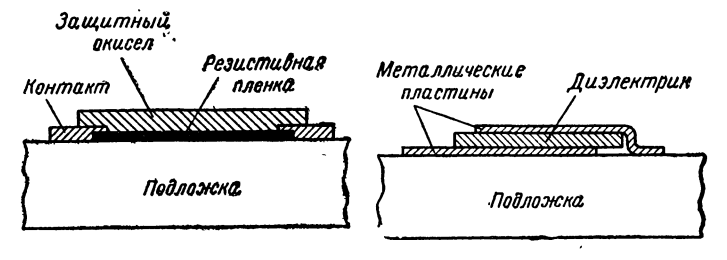


Рис. 5-5. Структура пленочного резистора.

Рис. 5-6. Структура пленочного конденсатора.

ночных элементов. На рис. 5-5 показана структура пленочного резистора, полученного испарением в вакууме. Резистивная пленка осаждается на предварительно очищенную подложку. Обычно резистивная пленка представляет собой осажденный нихром толщиной в несколько десятков нанометров. Пленки тоньше 10 нм редко используются в качестве резисторов, так как сопротивление в этом случае существенно зависит от качества подложки. Временные характеристики ультратонких пленок показывают плохую стабильность, так как даже локальные химические реакции между пленкой и окружающим пространством приводят к большим в процентном отношении изменениям сопротивления резистора. Нихром является очень популярным материалом для резисторов, потому что его проводимость очень стабильна при изменении температуры. Контакты с низким сопротивлением напыляются на края резистора, что облегчает соединение резистора с другими частями схемы. Для изготовления контактов с низким сопротивлением обычно используются золото, серебро и алюминий. При изготовлении нихромовых резисторов резистивная пленка часто покрывается диэлектриком, таким как моноокись крем-

, для защиты пленки от химических воздействий окружающей ды. На рис. 5-6 показано использование тонкопленочной техноло- для формирования конденсатора. Приведенная структура может ь получена последовательным испарением металла, диэлектрика, ример моноокиси кремния, и снова металла. Большинство диэлек- ческих пленок, которые могут быть получены вакуумным испаре- м, имеют относительно низкую диэлектрическую проницаемость, рудняя изготовление конденсаторов большой емкости. Выше бы- рассмотрены поперечные сечения пленочных резисторов и конден- оров Способы контроля продольных размеров этих приборов бу- рассмотрены ниже.

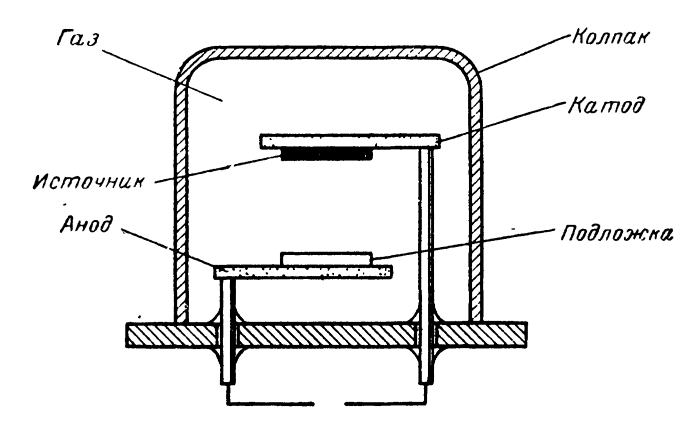


Рис. 5-7. Установка катодного распыления.

Метод катодного распыления. Вакуумное испарение может ис- льзоваться для осаждения тонких пленок практически всех матери- юв. Однако при применении материалов с высокой температурой іения достижение условий испарения представляет собой трудную ıачу. Катодное распыление позволяет осуществлять испарение при юсительно невысоких температурах. Основные части установки годного распыления показаны на рис. 5-7. Работа установки осно- вается на приложении нескольких тысяч вольт постоянного напря- ния между внутренними частями системы: катодом и анодом. ітериал для осаждения располагается на катоде, а подложка — аноде. Внутри колпака не требуется создания вакуума. Вместо эго рабочий объем камеры заполняется газом при давлении $^{-1}$—10^{-2} мм рт. ст. При таком низком давлении ионы газа имеют статочно большую длину свободного пробега (среднее расстояние жду столкновениями) и поэтому под действием постоянного элек- ического поля ускоряются до высоких скоростей. Рисунок 5-8 пояс- эт физические процессы, происходящие при катодном распылении. ны газа, ускоренные электрическим полем, сталкиваются с моле- лами испаряемого материала, который расположен на катоде, и бивают их Некоторые из этих молекул диффундируют к подложке эсаждаются на ней. Так как на ускорение ионов газа затрачивает-

ся энергия электрического поля и именно эта энергия приводит к удалению молекул от источника, то температура катода может поддерживаться относительно низкой. Распыление — более медленный процесс по сравнению с испарением в вакууме, и часто используется для осаждения таких материалов, как тантал, титан, молибден, вольфрам, платина и др. Тот факт, что распыление может выполняться при низких температурах, позволяет осаждать сложные по своему составу пленки, которые распадаются на составные компоненты в случае обычного испарения. Например, очень трудно получить испарением пленку стекла без существенного изменения его оксидной составляющей. Напротив, распыление часто специально используется для образования пленок стекла с заданной композицией. Выше упоминалось об использовании постоянного напряжения, что приемлемо для металлических пленок. Когда же производится напыление диэлектрических пленок, то подложка имеет тенденцию накапливать электрический заряд, который влияет на прикладываемое электрическое поле Эффективная передача материала от источника к подложке в этом случае осуществляется при помощи переменного поля и асимметричных электродов.

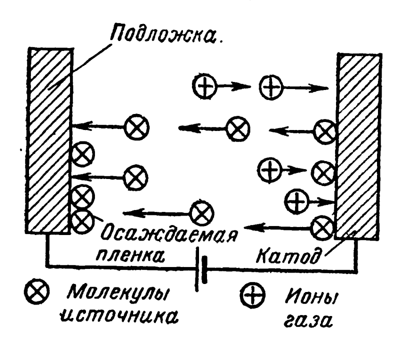


Рис. 5-8. Физические процессы при распылении.

Большинство распылительных систем работают в атмосфере инертного газа (например, аргона) при низком давлении. Выбор инертного газа объясняется необходимостью исключения возможных реакций газа с распыляемым материалом. Однако иногда целесообразно поддерживать какую-либо химическую реакцию во время распыления. Для этого в рабочий объем камеры вводится активный газ, такой как кислород или азот. Последнее имеет место при получении оксидных или нитридных изолирующих пленок.

ВОПРОСЫ

1. **Катодное распыление позволяет осаждать тонкие пленки при относительно невысоких . . . .**
2. **Техника катодного распыления основывается на приложении напряжения в несколько тысяч вольт между катодом . . . . и подложкой.**
3. **При катодном распылении давление газа в рабочей камере лежит в диапазоне от . . . . до . . . . мм рт. ст.**
4. **Сложные по составу пленки получаются методом распыления без изменения . . . . состава отдельных компонентов.**
5. **Аргон широко используется в качестве атмосферы при катодном распылении, так как это . . . . газ.**

ОТВЕТЫ

1. Катодное распыление позволяет осаждать тонкие пленки при относительно невысоких температурах.
2. Техника катодного распыления основывается на приложении напряжения в несколько тысяч вольт между катодом источника и подложкой.
3. При катодном распылении давление газа в рабочей камере лежит в диапазоне от 10^{-1} до 10^{-2} мм рт. ст.

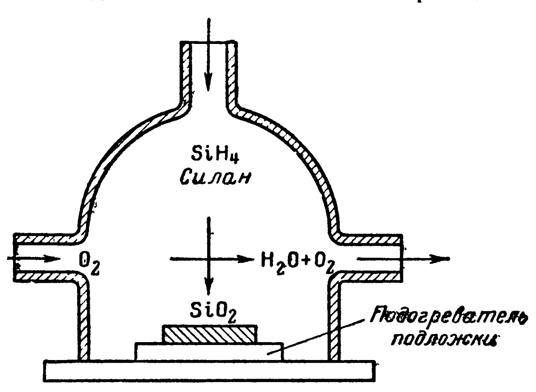


Рис. 5-9. Химическое осаждение двуокиси кремния.

4. Сложные по составу пленки получаются методом распыления без изменения химического состава отдельных компонентов.
5. Аргон широко используется в качестве атмосферы при катодном распылении, так как это инертный газ.

Способ химического осаждения. Для образования тонкопленочных элементов могут использоваться химические реакции. На рис. 5-9 показана установка для образования пленки двуокиси кремния на изолирующей подложке с использованием реакции силана SiH_4 и кислорода. Эта реакция проходит достаточно интенсивно при температуре ниже 500° С. Общая схема метода такова: органические соединения, содержащие нужный металл, в газообразном состоянии подвергаются высокотемпературному разложению (крекингу), в результате чего органические соединения удаляются в виде газа, а пленка металла осаждается на подложке. Пленка окиси олова образуется аналогичным способом. На рис. 5-10 показан процесс оса-

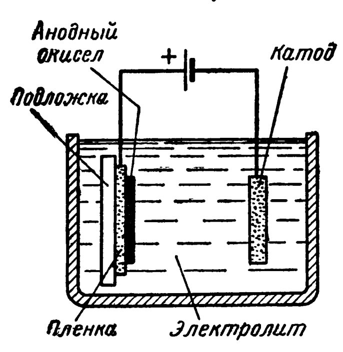


Рис. 5-10. Электролитическое окисление.

ждения окисной пленки на проводнике методом электролитического анодирования. Такой окисел может использоваться как диэлектрическая прокладка в конденсаторе, одной из обкладок которого является подложка, а второй — металлическая пленка, осажденная поверх окисла. Этот метод может быть также применен для увеличения сопротивления танталового тонкопленочного резистора. Толщина пленки тантала, полученной методом испарения или катодного распыления, уменьшается за счет выращивания окисла на поверхности пленки Уменьшение толщины приводит к возрастанию сопротивления резистора.

Для осаждения таких высокопроводящих пленок, как золото, серебро или медь, широко используется гальванизация. Так как нанесение гальванических покрытий на изолирующую подложку представляет собой некоторые трудности, то обычно сначала на подложке осаждается тонкий металлический слой методом испарения, распыления или химического разложения, а затем этот слой используется как основа для дальнейшей гальванизации. Высокопроводящие слои необходимы для соединения элементов на подложке и обеспечения соединения отдельных схем в систему.

ВОПРОСЫ

1. **Химическая реакция силана и кислорода используется для получения окисного покрытия на подложке при . . . .**
2. **Электролитический процесс может быть использован для образования изолирующей пленки на тантале или алюминии путем применения . . . .**
3. **Толстые слои таких высокопроводящих материалов, как медь, золото и серебро, могут осаждаться методом . . . .**
4. **Высокопроводящие слои необходимы для . . . . элементов.**

ОТВЕТЫ

1. Химическая реакция силана и кислорода используется для получения окисного покрытия на подложке при **низких температурах.**
2. Электролитический процесс может быть использован для образования изолирующей пленки на тантале или алюминии путем применения **анодирования.**
3. Толстые слои таких высокопроводящих материалов, как медь, золото и серебро, могут осаждаться методом **гальванизации.**
4. Высокопроводящие слои необходимы для **соединения** элементов.

Печатные резисторы. Один из простейших способов получения резисторов на изолирующей подложке показан на рис. 5-11. Резистивный материал подготавливается в виде порошка или пасты. Порошковая композиция обычно состоит из смеси металла, такого как золото или палладий, и связывающего материала, например моноокиси кремния или керамики. Подобная керамическая смесь обеспечивает высокую стабильность значения проводимости. Маска с рисунком размещается на подложке и резистивный порошок вдавли-

вается в отверстия, как показано на рисунке. Точность размеров резисторов, изготовленных таким способом, составляет около 120 мкм. Это много ниже точности тонкопленочных резисторов, поэтому печатные резисторы неэффективно используют площадь подложки. Крупный недостаток, связанный с плохой разрешающей способностью, в какой-то мере компенсируется высоким значением удельного сопротивления резистивных паст. Пленки, получаемые этим способом, имеют относительно большую толщину. Поэтому на практике их удельное электрическое сопротивление обычно определяется подбором состава керамики.

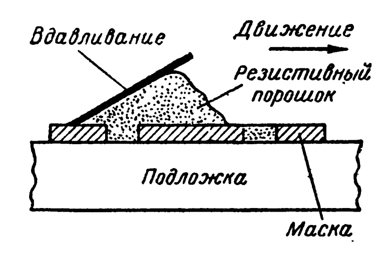


Рис. 5-11. Печатный резистор.

Плёнки кремния. Кремний широко используется в качестве материала подложки для полупроводниковых интегральных схем, свойства которых будут подробно рассмотрены в шестой главе. Однако существует ряд областей, где кремний используется как материал подложки для тонкопленочных элементов — резисторов и конденсаторов. На кремниевой подложке легко может быть получен изолирующий слой двуокиси кремния путем его окисления (рис. 5-12). Процесс окисления проходит при температуре от 1000 до 1200 °С. Типовая толщина окисла составляет от 0,1 до 1000 нм. Двуокись кремния имеет диэлектрическую постоянную около 4 и может использоваться как диэлектрик в небольших конденсаторах. Так как алюминий и хром хорошо соединяются с окислом, то пленки этих металлов, напыленные на окисел, часто используются для изготовления межэлементных соединений. На кремниевой плате могут изготовляться также тонкопленочные резисторы из нихрома для соединения с транзисторами, полученными на этой же подложке методом обычной транзисторной технологии.

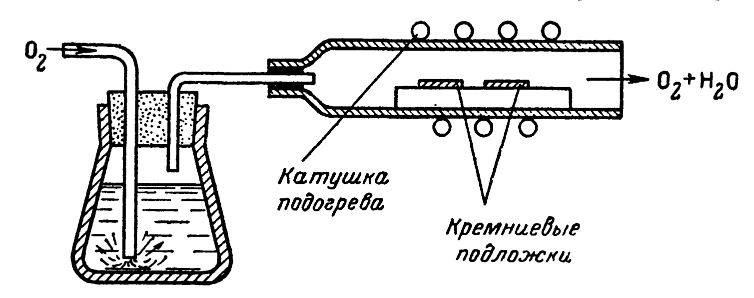


Рис. 5-12. Окисление кремния.

ВОПРОСЫ

1. **Печатные резисторы изготовляются вдавливанием резистивной пасты на изолирующую подложку через металлическую . . . .**

2. **Пленки, получаемые при изготовлении печатных резисторов, относительно толстые, поэтому выбор сопротивления резисторов в этом случае осуществляется подбором состава . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Печатные резисторы изготовляются вдавливанием резистивной пасты на изолирующую подложку через металлическую **маску.**
2. Пленки, получаемые при изготовлении печатных резисторов, относительно толстые, поэтому выбор сопротивления резисторов в этом случае осуществляется подбором состава **керамики.**

Техника изготовления элементов. На предыдущих страницах обсуждались различные способы нанесения пленок металлов и диэлектриков на подложки. Чтобы использовать эти пленки для создания элементов электронных схем, необходим контроль их размеров, который может осуществляться различными способами.

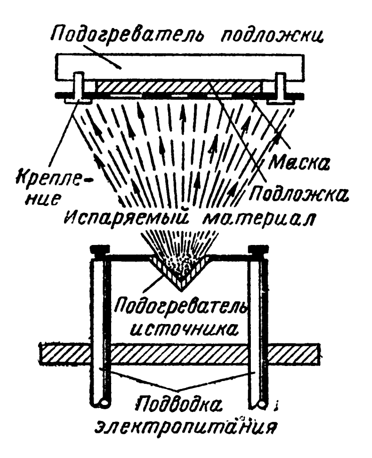


Рис. 5-13. Напыление через металлическую маску.

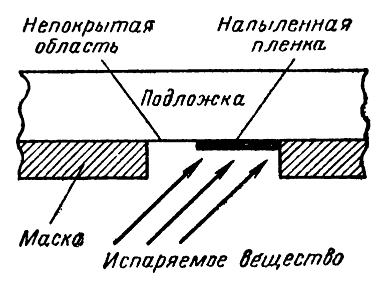


Рис. 5-14. Теневой эффект при напылении через маску.

Механические маски. Простейшим способом осаждения пленки заданной формы является расположение маски между испарителем и подложкой (рис. 5-13). Окна в маске должны соответствовать нужному геометрическому рисунку. Испаряемый материал, осаждаясь на подложку, будет иметь форму или очертания соответствующих окон.

Простота механических масок определяет их широкое использование для получения заданной формы тонких пленок на подложке. Этот способ может быть использован для напыления почти всех металлов и диэлектриков. Сложные пленки могут изготовляться с помощью использования нескольких материалов при их поочередном нагревании в одном и том же рабочем объеме. Так как вакуум под колпаком не нарушается между отдельными операциями, то могут быть получены хорошая чистота пленок и их надежное сцепление между собой. Изготовление специальных приспособлений для

передвижения или даже замены масок позволяет изменять форму напыляемых пленок без нарушения вакуума. В этом случае на подложке получаются как готовые пленочные элементы, так и все необходимые соединения.

Несмотря на простоту, метод механических масок имеет ряд принципиальных недостатков. Прежде всего очевидно, что этим способом затруднено получение ряда геометрических рисунков. Такие рисунки, как круги и полосы, получаются достаточно просто, но выгнутые фигуры типа эллипса требуют усложнения технологических операций. Очень серьезное ограничение связано с разрешающей способностью способа механических масок. Из рис. 5-13 видно, что испаряемый материал достигает подложки не только под прямым углом. Более подробно это иллюстрируется рис. 5-14. Используемые маски должны иметь толщину не менее 25 мкм, чтобы обладать достаточной механической стабильностью и прочностью. Верхний край маски создает «тень», которая препятствует полному покрытию пленкой окна. Для того чтобы обеспечить осаждение материала под углом, близким к прямому, используются различные способы. Применяются большие площади испаряющих источников или небольшие размеры подложек. Все это приводит к нежелательным усложнениям и ограничению возможностей рассматриваемого способа. Другой фактор, влияющий на разрешающую способность, состоит в том, что при нагревании подложки температурное расширение маски и подложки может быть различным. Для больших размеров это, естественно, не столь важно, но является принципиальным препятствием для совмещения малых областей. На практике разрешающая способность механических масок составляет ± 5 мкм.

ВОПРОСЫ

1. **Простейший способ формирования рисунка напыляемых пленок состоит в расположении механической маски между . . . . и . . . .**
2. **Широкое использование способа механических масок объясняется его простотой и возможностью применения к . . . . материалам.**
3. **Способ механических масок имеет два недостатка, которые связаны с трудностью получения ряда . . . ., рисунков и низкой . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Простейший способ формирования рисунка напыляемых пленок состоит в расположении механической маски между **испаряемым материалом** и **подложкой.**
2. Широкое использование способа механических масок объясняется его простотой и возможностью применения к **различным** материалам.
3. Способ механических масок имеет два недостатка, которые связаны с трудностью получения ряда **геометрических** рисунков и низкой **разрешающей способностью.**

Фоторезистивный способ отличается от способа механического маскирования тем, что вместо селективного осаждения материал осаждается по всей поверхности, а затем удаляется с определенных

участков. После осаждения пленки на подложку она покрывается фоточувствительным лаком. На лак накладывается фотографическая пластинка (фотошаблон) с необходимой конфигурацией элементов и вся система засвечивается специальным световым источником. Затем фотошаблон удаляется и лак (фоторезист) проявляется, в результате чего образуются окна, как показано на рис. 5-15. После этого подложка протравливается для удаления пленки в областях окон. Выполнение этого процесса требует раствора, удаляющего пленку, но слабо взаимодействующего с фоторезистивной маской. Если напыленная пленка трудно подвергается травлению, то используется об-

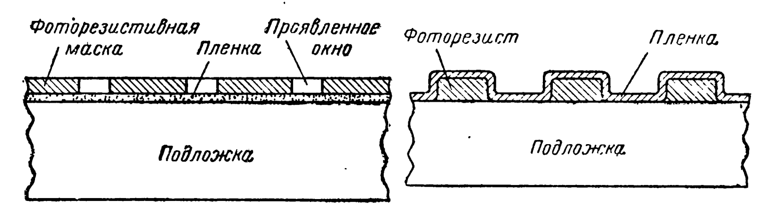


Рис. 5-15. Маскирование фоторезистом.

Рис. 5-16. Обратное маскирование фоторезистом.

ратный процесс, показанный на рис. 5-16. При этом фоторезист наносится непосредственно на подложку и проявляется для образования нужного рисунка. Затем материал пленки осаждается на поверхность фоторезиста и оголенные места подложки. Пленка будет плотно сцепляться с подложкой, но не с фоторезистом, поэтому ненужные участки пленки могут быть удалены механическим путем или промывкой, а фоторезист, как и в первом случае, удаляется химическим способом.

Обычно толщина фоторезистивных пленок составляет несколько десятых долей микрометра, поэтому разрешающая способность много лучше 1 мкм. Так как рисунок на фоторезисте создается с помощью фотографической пленки, то возможно получение любого плоского изображения. Однако использование химических операций делает этот способ более сложным по сравнению с напылением через металлическую маску. Кроме того, даже в обратном процессе ограничения, связанные с температурным режимом подложки, затрудняют осаждение некоторых материалов.

ВОПРОСЫ

1. **При использовании фоторезистивного способа пленка осаждается на всю подложку и затем . . . . удаляется.**
2. **Фоторезистивный способ позволяет получать любую . . . . элементов и обеспечивает хорошую . . . .**

ОТВЕТЫ

1. При использовании фоторезистивного способа пленка осаждается на всю подложку и затем **селективно удаляется.**

2. Фоторезистивный способ позволяет получать любую **форму** элементов и обеспечивает хорошую **разрешающую способность.**

5-2. ПАССИВНЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Резисторы. Структура резистора показана на рис. 5-17. Сопротивление резистора выражается через удельное сопротивление используемого материала и геометрические размеры следующим образом:

$$R = \rho \frac{l}{tw},$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление материала.

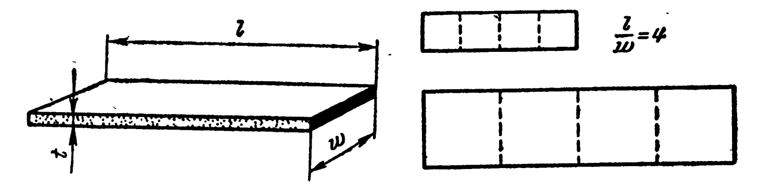


Рис. 5-17. Структура резистора.

Рис. 5-18. Резисторы с равными сопротивлениями.

Это выражение может быть записано в форме

$$R = \frac{\rho}{t} \frac{l}{w}.$$

Для резисторов, полученных осаждением пленки на изолирующую подложку, величина ρ/t будет постоянна по всей площади подложки для всех резисторов. Эта постоянная называется сопротивлением слоя пленки и обозначается R_s. Поэтому сопротивление тонкопленочного резистора может быть выражено следующим образом:

$$R = R_s \frac{l}{w}.$$

Это означает, что сопротивление тонкопленочного резистора не зависит от его площади, а определяется формой резистора. Последнее иллюстрируется на рис. 5-18, где сравниваются два резистора, имеющих одинаковое отношение длины к ширине, равное $l/w = 4$, и, следовательно, одинаковые сопротивления. Размеры тонкопленочного резистора определяются не только требуемым сопротивлением, но и технологическими возможностями. Естественно, целесообразно изготавливать элементы с возможно малыми размерами, однако любой способ получения пленок имеет ограниченную точность, которая определяет минимальные размеры линий. Это ограничение определяет минимальную ширину, которую могут иметь резисторы. Если требуется получение точного значения сопротивления резистора, то

должна использоваться структура с большей шириной. Требования рассеяния мощности связаны с другим фактором — площадью тонкопленочного резистора. Если его площадь не соответствует размерам, достаточным для отвода тепла, то резистор может быть нестабильным во время работы или вообще выйти из строя.

Используя формулу для сопротивления резистора, нетрудно показать, что сопротивление резистора, имеющего квадратную форму, равно сопротивлению слоя. По этой причине сопротивление слоя обычно измеряется в омах на квадрат.

Обычно пленочные резисторы из нихрома и тантала имеют сопротивление слоя от 200 до 400 Ом/квадрат. Более тонкие пленки этих металлов имеют плохую стабильность и трудны в изготовлении. Сопротивление слоя в несколько тысяч ом на квадрат получается путем одновременного осаждения металла и диэлектрика, в результате чего образуется керамическая проводящая пленка. Примером такого резистора может служить соединение хром — кремний — моноокись кремния, которое получается одновременным напылением всех составных компонентов.

ВОПРОС

Сопротивление пленочного резистора определяется его геометрией и . . . . пленки.

ОТВЕТ

Сопротивление пленочного резистора определяется его геометрией и **сопротивлением слоя** пленки.

Для получения точного сопротивления пленочного резистора необходимо контролировать его размеры и сопротивление слоя пленки. Влияние геометрических ошибок уменьшается выбором размеров резистора, существенно превышающих разрешающую способность используемого способа измерения. Контроль сопротивления слоя более сложен. Используя измерение значения сопротивления в течение процесса осаждения пленки, удается получить точность ±5%. Некоторые пленки позволяют подгонять сопротивление слоя после напыления. Это иллюстрируется на примере танталового пленочного резистора (рис. 5-19). Уменьшение толщины металлической пленки и, следовательно, увеличение ее сопротивления достигается с помощью формирования окисла тантала на поверхности пленки. Окисление может быть выполнено или электролитическим анодированием или нагревом пленки в воздухе до температуры выше 250° С. Подобный способ позволяет получить точность сопротивления слоя ±1%.

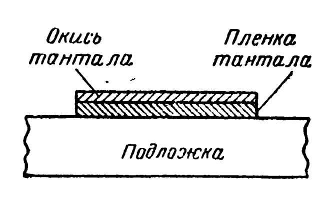


Рис. 5-19. Танталовая резистивная пленка.

Конденсаторы. На рис. 5-20 показана структура тонкопленочного конденсатора. Нижняя металлическая пластина покрывается диэлек-

трической пленкой, на которую в свою очередь наносится верхняя пластина. Емкость вычисляется по формуле

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12},$$

где ε — диэлектрическая проницаемость; d — толщина диэлектрика; S — площадь пластин

Для увеличения емкости необходимо использовать диэлектрические пленки минимальной толщины и с максимальной диэлектрической проницаемостью. Одно из важных условий, предъявляемых к технологии изготовления конденсаторов, заключается в совместимости этого процесса с технологией изготовления резисторов. Например, моноокись кремния часто используется для герметизации пленочных резисторов. В этом случае конденсатор может легко изготовляться во время получения низкоомных контактных площадок

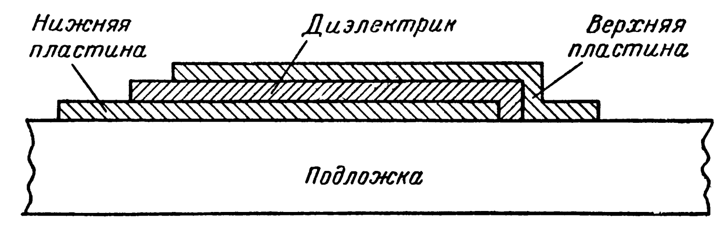


Рис. 5-20. Структура пленочного конденсатора.

нанесением металла на поверхность моноокиси кремния. В качестве диэлектрика может использоваться также окись тантала. Получение такой окиси было описано выше при рассмотрении способа анодного окисления. Диэлектрическая проницаемость моноокиси кремния равна примерно 4, у окиси тантала — в три-четыре раза больше. Это относительно малые величины, однако пленки окиси тантала часто используются для изготовления пассивных элементов вследствие простоты их изготовления. Диэлектрическую постоянную от сотен до нескольких тысяч имеют окислы титана, например титанат бария. Однако осаждение его требует тщательного контроля технологических процессов для получения хороших результатов.

ВОПРОСЫ

1. **Минимальные размеры тонкопленочных резисторов определяются разрешающей способностью используемого метода измерения и условиями . . . . тепла.**
2. **Изоляторы с низкой величиной диэлектрической постоянной часто используются для изготовления тонкопленочных конденсаторов вследствие . . . . технологии их изготовления с процессом получения тонкопленочных резисторов.**

ОТВЕТЫ

1. Минимальные размеры тонкопленочных резисторов определяются разрешающей способностью используемого метода измерения и условиями **рассеяния** тепла.

2. Изоляторы с низкой величиной диэлектрической постоянной часто используются для изготовления тонкопленочных конденсаторов вследствие совместимости технологии их изготовления с процессом получения тонкопленочных резисторов.

Индуктивности. Спиральная структура тонкопленочной индуктивности показана на рис. 5-21. В то время как тонкопленочные рези-

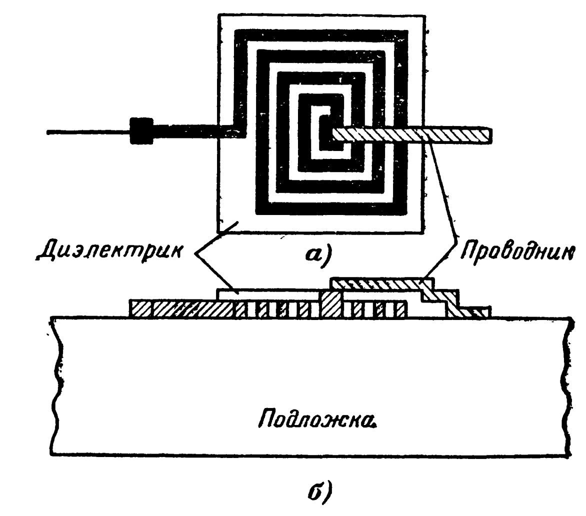


Рис. 5-21. Структура тонкопленочной катушки индуктивности.

а — вид сверху; *б* — поперечное сечение.

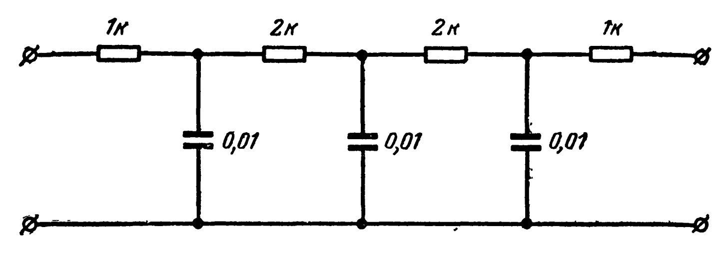


Рис. 5-22. Схема *RC*-фильтра.

торы по своим номиналам и качеству соответствуют обычным дискретным элементам, то тонкопленочная индуктивность не превышает нескольких микрогенри и имеет добротность около 20. Из-за этих ограничений пленочные индуктивности используются достаточно редко.

***RC*-цепи.** Существует ряд электронных функций, которые могут быть выполнены при использовании только резистивных и емкостных элементов. Примером такой функции является схема фильтра

(рис. 5-22). На рис. 5-23 показано, каким способом эта схема может быть выполнена в тонкопленочном виде. Резисторы в схеме образованы на основе пленки с сопротивлением слоя 200 Ом/квадрат. Резистор с сопротивлением 1000 Ом имеет в пять раз большую длину по сравнению с шириной. Более высокие номиналы резисторов обычно формируются в виде «змейки» для того, чтобы увеличить плотность упаковки. Влияние изгибов на изменение эффективной длины резисторов может быть учтено при определении топологии схемы. Площадь, необходимая для расположения конденсаторов, зависит от толщины диэлектрика и его диэлектрической проницаемости. Считая диэлектрическую проницаемость равной 14 и толщину пленки 100 нм,

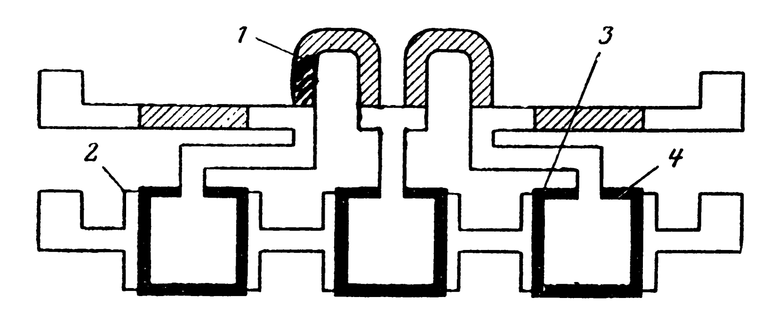


Рис. 5-23. Топология тонкопленочной схемы.

1 — резистивная пленка; *2* — нижняя пластина конденсатора; *3* — диэлектрическая пленка; *4* — верхняя пластина конденсатора.

нетрудно определить, что для размещения конденсатора емкостью 0,01 мкФ требуется площадь около 8 мм^2, т. е. каждый конденсатор будет занимать площадь, равную площади квадрата со стороной приблизительно 3 мм.

ВОПРОСЫ

1. **Тонкопленочная индуктивность не превышает нескольких . . . .**
2. **Два резистора на рис. 5-23 сопротивлением 2000 Ом имеют длину, в . . . . раз большую по сравнению с их . . . .**
3. **Площадь, занимаемая конденсатором, зависит от . . . . диэлектрика и его . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Тонкопленочная индуктивность не превышает нескольких **микрогенри.**
2. Два резистора на рис. 5-23 сопротивлением 2000 Ом имеют длину, в **10** раз большую по сравнению с их **шириной.**
3. Площадь, занимаемая конденсатором, зависит от **диэлектрической проницаемости** диэлектрика и его **толщины.**

5-3. АКТИВНЫЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Несмотря на то, что многие электронные функции могут быть выполнены комбинацией резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности, все же подавляющее большинство схем в существующих системах не могут быть реализованы без использования активных приборов, которые позволяют получать усиление мощности. Эффективность тонкопленочной технологии ограничивается необходимостью использования дискретных транзисторов и диодов. По этой причине значительные усилия были сделаны в области разработки способов изготовления транзисторных структур на изолирующей подложке.

Существуют два основных типа транзисторных структур. На рис. 5-24 показана наиболее распространенная на практике структура биполярного транзистора. Полупроводниковый материал легируется

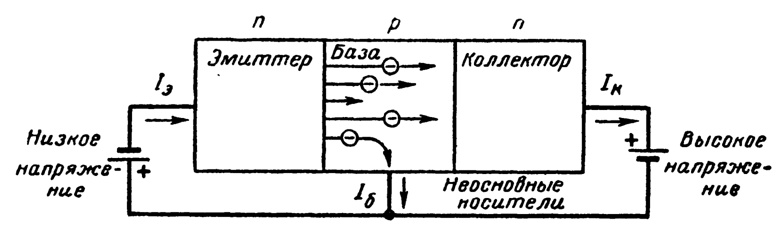


Рис. 5-24. Биполярный транзистор.

таким способом, чтобы получить *p-n-p* или *n-p-n* структуры, в которых между эмиттером и базой и между коллектором и базой образуются выпрямляющие переходы. Эмиттер по отношению к базе имеет прямое смещение, а коллектор — обратное. Смещенный в прямом направлении эмиттерный переход инжектирует неосновные носители в область базы. Присутствие носителей обоих знаков и определяет название транзистора — биполярный. Неосновные носители — это электроны в области *p*-типа или положительно заряженные «дырки» в области *n*-типа. Инжекция неосновных носителей происходит при низком напряжении. Инжектированные неосновные носители, достигшие коллекторного перехода, захватываются высоким напряжением в цепи коллектора. Так как инжекция заряда осуществляется при низком напряжении, а экстракция, т. е. собирание носителей в коллекторе, происходит при высоком напряжении, то возможно получение усиления мощности. Неосновные носители за время пролета через базовую область могут исчезать за счет рекомбинации с основными носителями. Поэтому для работы транзистора необходимо, чтобы большинство носителей достигало коллектора до процесса рекомбинации. Или, иными словами, «время жизни» неосновных носителей должно быть достаточно большим, что может быть получено только в чистых полупроводниковых материалах, имеющих регулярную кристаллическую структуру. Но чрезвычайно трудно напылить полупроводниковую пленку на изолирующую подложку без значительного нарушения ее кристаллического строения. Поэтому изготовление биполярных транзисторов несовместимо с тонкопленочной технологией.

Полевые или униполярные транзисторы (рис. 5-25) имеют структуру, в которой усиление мощности достигается без ограничений на

время жизни неосновных носителей. Ток от истока к стоку образуется за счет движения основных носителей. Когда переход имеет обратное смещение, то образующаяся вокруг него «обедненная область» препятствует движению основных носителей. Это уменьшает сечение, по которому может протекать ток, и приводит к увеличению сопротивления между истоком и стоком.

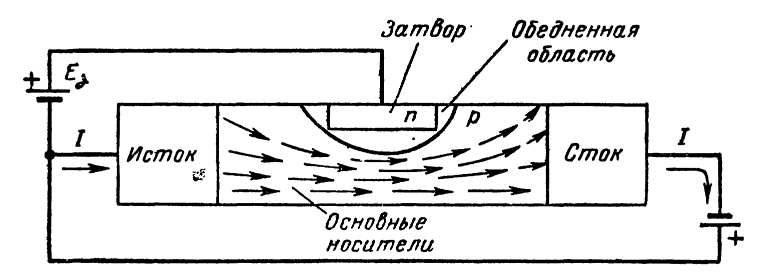


Рис. 5-25. Полевой транзистор.

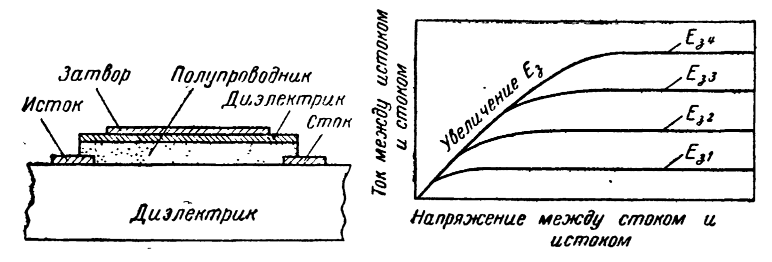


Рис. 5-26. Пленочный полевой транзистор с изолированным затвором.

Рис. 5-27. Выходные характеристики полевого транзистора с изолированным затвором.

Расширение обедненной области зависит от величины напряжения, приложенного к управляющему электроду или затвору. Следовательно, напряжение на затворе управляет током между стоком и истоком Этим механизмом и достигается усиление мощности в полевых приборах.

Хотя работа полевого транзистора не зависит от времени жизни неосновных носителей, требования достаточно высокого пробивного напряжения управляющего перехода не могут быть обеспечены качеством большинства осаждаемых полупроводниковых пленок. Кроме того, температура, необходимая для получения даже одного *p-n* перехода, несовместима с температурными режимами, используемыми при получении тонких пленок.

На рис. 5-26 показана структура полевого транзистора без переходов. Это пленочный полевой транзистор с изолированным затвором. Структура может быть получена напылением истокового и стокового электродов, осаждением тонкой пленки полупроводника, такого как сульфид кадмия, осаждением изолирующей пленки, например, моноокиси кремния и напылением электрода затвора, пере-

крывающего пространство между стоком и истоком. Если на затвор относительно истока подается положительное напряжение, то электроны будут притягиваться к поверхности полупроводника. Это вызовет уменьшение удельного сопротивления и увеличение тока между стоком и истоком. Выходные характеристики такого тонкопленочного транзистора показаны на рис. 5-27. Они свидетельствуют об «обогащении» пространства исток — сток подвижными носителями при увеличении напряжения на затворе. При увеличении напряжения между стоком и истоком ток сначала растет линейно. Дальнейшее увеличение напряжения вызывает медленное изменение тока вплоть до его «насыщения», т. е. достижения некоторого постоянного значения. Напряжение насыщения различно для разных значений напряжения на затворе. Эффект насыщения объясняется тем, что падение напряжения в полупроводнике за счет протекания тока от истока к стоку уменьшает смещение между затвором и подложкой, снижая эффект «обогащения». В настоящее время известны схемы, изготовленные с применением тонкопленочных транзисторов, но технология производства таких схем еще полностью не отработана для того, чтобы их можно было использовать в серийной аппаратуре. Полевые транзисторы имеют некоторые преимущества перед биполярными приборами, так как обладают высоким входным сопротивлением и могут работать при больших напряжениях на входных зажимах. В случае приборов с изолированным затвором возможно управление как положительными, так и отрицательными сигналами. Биполярные транзисторы имеют более высокий коэффициент передачи и поэтому предпочтительнее в цифровых схемах.

ВОПРОСЫ

1. **Усиление мощности в биполярном транзисторе обеспечивается за счет инжекции носителей при . . . . напряжении с одного перехода и их собиранием на другом переходе при . . . . напряжении.**
2 **Полупроводниковый материал, используемый для изготовления биполярных транзисторов, должен иметь регулярную кристаллическую структуру для того, чтобы обеспечить необходимое значение времени жизни . . . .**
3. **Влияние времени жизни неосновных носителей на работу . . . . транзисторных структур менее важно, чем биполярных приборов.**
4 **Тонкопленочные транзисторы изготавливаются на основе полевых структур с . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Усиление мощности в биполярном транзисторе обеспечивается за счет инжекции носителей при **низком** напряжении с одного перехода и их собиранием на другом переходе при **высоком** напряжении.
2 Полупроводниковый материал, используемый для изготовления биполярных транзисторов, должен иметь регулярную кристаллическую структуру для того, чтобы обеспечить необходимое значение времени жизни **неосновных носителей.**
3. Влияние времени жизни неосновных носителей на работу

полевых транзисторных структур менее важно, чем биполярных приборов.
4. Тонкопленочные транзисторы изготавливаются на основе полевых структур с **изолированным затвором**.

Кремниевые пленки. Стремление получить пленочные активные приборы такого же качества, как биполярные транзисторы, привело к поискам новых путей создания высококачественных полупроводниковых слоев на изолирующей подложке. При непосредственном напылении кремниевых пленок на подложку получаются поликристаллические слои с плохими электрическими свойствами. Более качественные пленки могут быть изготовлены при использовании химической реакции, показанной на рис. 5-28. Смесь четыреххлористого кремния и водорода нагревается до температуры 900—1000° С. В результате химической реакции элементарный кремний осаждается на подложку, а водород и хлор удаляются в виде газообразной соляной кислоты. На рис. 5-29 показано устройство для проведения такого технологического процесса.

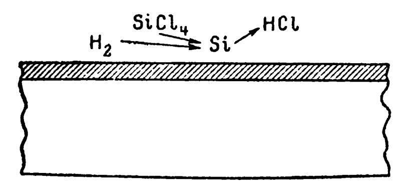


Рис. 5-28. Осаждение пленки кремния.

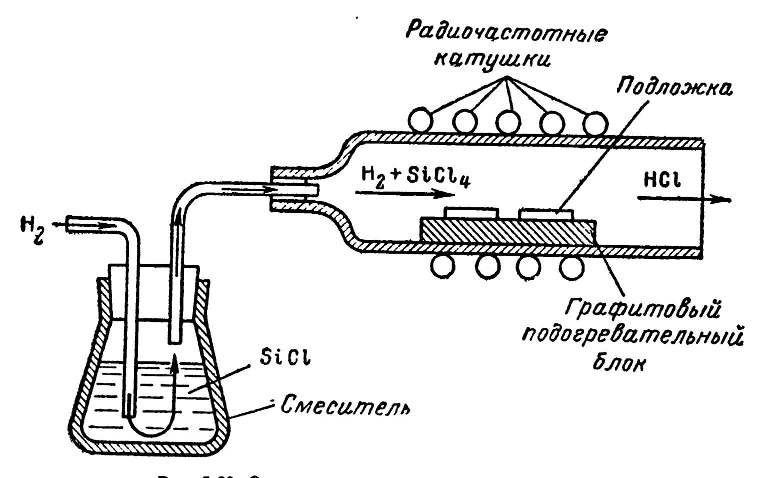


Рис. 5-29. Система осаждения пленки кремния.

Смесь водорода и четыреххлористого кремния получается пропусканием пузырьков водорода через раствор. Подложка, на которую проводится осаждение, располагается на графитовом блоке в трубе, окруженной электрической катушкой. При приложении к катушке колебаний радиочастотного диапазона вихревые токи или токи Фуко, возникающие в графитовом блоке, нагревают его. В такой системе может быть получена скорость осаждения примерно 1 мкм в минуту.

Качество осаждаемой пленки в значительной мере определяется структурой подложки. Очень высококачественные слои получаются на кремниевой подложке. Кремниевая эпитаксиальная технология позволяет получать слои, проводимость и толщина которых могут контролироваться в соответствии с требованиями изготовляемого прибора. Гораздо худшие результаты получаются при использовании других подложек. Некоторый успех получен в осаждении кремния на сапфир. Это связано с тем, что сапфир имеет кристаллическую структуру. Использование сапфира позволяет получать достаточно хорошие диоды и полевые транзисторы.

ВОПРОСЫ

1 **Слои кремния, полученные с помощью напыления, имеют плохие электрические характеристики вследствие их . . . . структуры.**
2 **Пленки кремния могут быть получены в результате химической реакции между четыреххлористым кремнием и . . . .**
3 **Качество осаждаемого слоя зависит от структуры . . . .**
4 **Кремний может успешно осаждаться на изолирующую подложку кристаллического . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Слои кремния, полученные с помощью напыления, имеют плохие электрические характеристики вследствие их **поликристаллической** структуры.
2. Пленки кремния могут быть получены в результате химической реакции между четыреххлористым кремнием и **водородом.**
3 Качество осаждаемого слоя зависит от структуры **подложки.**
4. Кремний может успешно осаждаться на изолирующую подложку кристаллического **сапфира.**

5-4. МАГНИТНЫЕ ПЛЕНКИ

Магнитные свойства некоторых веществ могут быть использованы для успешного выполнения ряда электронных функций. Требования миниатюризации соответствующего электронного оборудования положили начало поискам методов получения тонкопленочных магнитных элементов.

Магнитные свойства. Магнитное поле связано с линиями магнитного потока. Для определения плотности таких линий используется символ Φ. Чем больше число линий на единицу площади, тем сильнее магнитное поле. Как показано на рис. 5-30, магнитное поле образуется при протекании тока через катушку. С другой стороны, изменение магнитного потока около проводника вызывает или индуцирует на его зажимах напряжение. Если в левой катушке возникает намагничивающий ток, то поле в сердечнике будет изменяться от нуля до некоторой величины Φ. Это приведет к индуцированию напряжения на катушке, расположенной в правой части сердечника. Если ток пре-

кращается, то поток уменьшается, и в катушке индуцируется напряжение противоположной полярности. Напряжение возникает только при изменении потока. Магнитный поток в сердечнике зависит от величины намагничивающего тока и магнитных свойств материала. В немагнитных материалах, как видно из рис. 5-31, *а*, изменение тока приводит к незначительным изменениям величины магнитного потока.

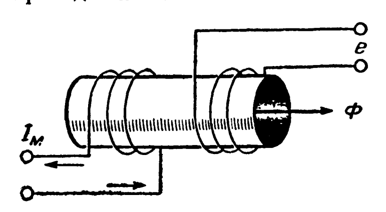


Рис. 5-30. Возникновение напряжения при изменении магнитного потока.

В магнитных материалах соответствующее изменение может быть сильнее более чем в 1000 раз. Из рис. 5-31, *б*, где показана характеристика намагничивания ферромагнетика, следует, что при первоначальном намагничивании поток изменяется пропорционально намагничивающему току. Однако по мере увеличения значения $I_м$ поток возрастает более медленно и наконец достигает «насыщения», соответствующего максимальной величине потока. При уменьшении тока до нуля поток остается равным некоторой величине, обозначенной точкой *A*. При изменении направления намагничивающего тока по-

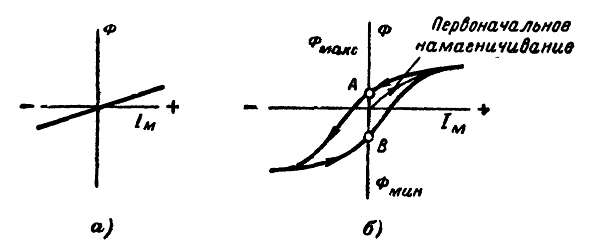


Рис. 5-31. Изменение потока с током намагничивания.

а — немагнитный материал; *б* — ферромагнитный материал.

ток уменьшается до нуля и по мере увеличения тока достигает величины насыщения в отрицательном направлении. Нулевому току на обратной ветви соответствует величина потока, обозначенная точкой *B*. Таким образом, когда намагничивающий ток отсутствует, в материале существует два различных по величине магнитных потока, соответствующих условиям предыдущего состояния. Это свойство «помнить» предыдущее состояние намагничивания и используется для создания электронных запоминающих устройств.

ВОПРОСЫ

1. **Напряжение индуцируется при изменении .... потока.**
2. **Величина остаточного магнитного потока, сохраняющаяся при нулевом токе, зависит от .... состояния намагничивания.**

ОТВЕТЫ

1. Напряжение индуцируется при изменении **магнитного потока**.
2. Величина остаточного магнитного потока, сохраняющаяся при нулевом токе, зависит от **предыдущего** состояния намагничивания.

Кривая на рис. 5-31, *б*, соответствующая изменению тока намагничивания в положительном и отрицательном направлениях, называется петлей гистерезиса. При использовании магнитного

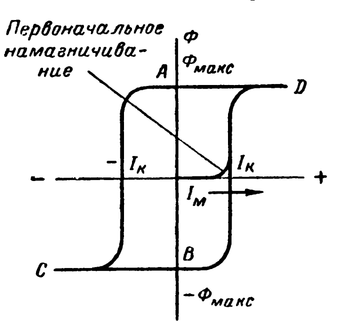


Рис. 5-32. Прямоугольная петля гистерезиса.

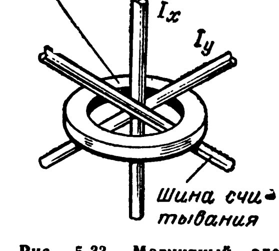


Рис. 5-33. Магнитный элемент памяти.

материала в качестве элемента памяти желательно, чтобы точки *A* и *B* были максимально удалены одна от другой. Это достигается в материалах с петлей гистерезиса прямоугольной формы.

На рис. 5-32 показана прямоугольная петля гистерезиса. Поток, соответствующий нулевому току намагничивания, лишь немного меньше максимальной величины, которая получается при полном намагничивающем токе. Кроме того, изменение потока с током в этом случае очень резкое. Ток намагничивания, необходимый для насыщения, называется критическим током и обозначен на рисунке $I_к$. Если начальное условие соответствует положительному значению максимального потока $Ф_{макс}$, то для изменения величины потока необходимо, чтобы

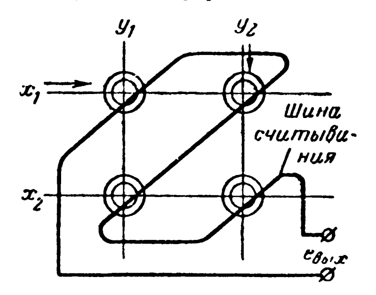


Рис. 5-34. Соединение ферритовых колец в запоминающей системе.

ток превысил критическое значение в отрицательном направлении. Поток при этом изменится до максимального отрицательного значения. Дальнейшее увеличение намагничивающего тока не приводит к заметному изменению потока. На рис. 5-33 показано использование описанных свойств для построения запоминающего элемента в вычислительных машинах. Элемент представляет собой ферритовое кольцо с прямоугольной петлей гистерезиса и

пересекающих его проводников. Максимальному и минимальному значниям магнитного потока соответствуют состояния «0» или «1». Ток намагничивания является суммой величин I_x и I_y. Этот ток может быть равен нулю или принимать два значения: $^1/_2 I_к$ или $I_к$. Критическое значение тока намагничивания достигается в том случае, если токи в обоих шинах x и y имеют одинаковое направление. Критический ток намагничивания используется для опроса ячейки с тем, чтобы выяснить, в каком состоянии находится кольцо. Допустим, что состояние намагничивания кольца соответствует точке A на рис. 5-32. При приложении тока, достаточного для изменения магнитного потока до величины, соответствующей точке C, общее изменение потока будет составлять $2\,\Phi_{макс}$ и на шине считывания появится соответствующее индуцированное напряжение. Изменение состояния от точки B к D будет индуцировать напряжение противоположной полярности. Что же касается переходов от A к D или от B к C, то в этом случае напряжение не индуцируется. Таким образом, измеряя сигнал на шине считывания и зная, какое кольцо в данный момент опрашивается, можно получить информацию о состоянии выбранного элемента памяти. На рис. 5-34 показано соединение нескольких запоминающих колец в матрицу памяти. Обращение к данному элементу выполняется с помощью адресных шин x и y. Например, опрос правого кольца в верхнем ряду осуществляется подачей намагничивающего тока по шинам x_1 и y_2. Выходное напряжение снимается с шины считывания.

ВОПРОС

Для построения запоминающих элементов в вычислительных машинах желательно иметь магнитный материал с .... петлей гистерезиса.

ОТВЕТ

Для построения запоминающих элементов в вычислительных машинах желательно иметь магнитный материал с **прямоугольной** петлей гистерезиса.

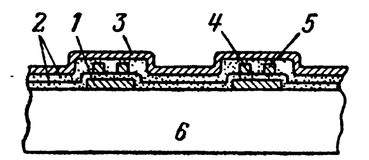


Рис. 5-35. Тонкопленочный магнитный элемент памяти.

1 — магнитная пленка; *2* — диэлектрик; *3* — шина считывания; *4* — шина x; *5* — шина y; *6* — подложка.

Тонкие магнитные пленки. На рис. 5-35 показан способ выполнения запоминающей ячейки на основе тонкой магнитной пленки. Для изготовления ячейки тонкая пленка из сплава никель — железо осаждается в виде небольших островков на изолирующую подложку. Осаждение может быть выполнено испарением, распылением или химическим способом. Толщина пленки должна быть достаточной для того, чтобы ток намагничивания, протекая с одной стороны пленки, создавал необходимый для работы магнитный поток. Адресные шины и линия считывания осаждаются над островками магнит-

ной пленки, последовательно чередуясь с изолирующими слоями, чтобы исключить возможность пересечения проводящих шин. На рис. 5-36 показана топология запоминающей матрицы на магнитных пленках.

Существует много причин, в силу которых к памяти на магнитных пленках проявляется очень большой интерес. Для перемагничивания пленок требуется гораздо меньшая энергия, чем в случае ферритовых колец. Трудоемкая и дорогая операция «прошивания» проводящими шинами отдельных ферритовых колец заменяется одновременным получением соединений между большим количеством

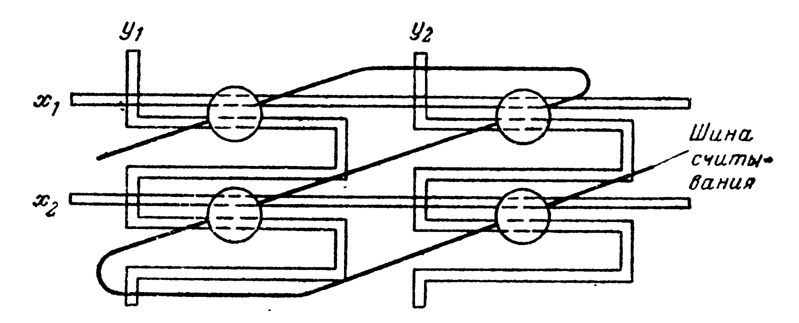


Рис. 5-36. Структура запоминающего устройства на магнитных пленках.

запоминающих ячеек. Последнее становится возможным благодаря использованию напыления. Кроме того, при использовании пленочных систем могут быть достигнуты большие скорости перемагничивания. Это объясняется тем, что физические процессы, связанные с изменением магнитного потока в пленках, отличаются от достаточно медленного механизма перемагничивания в ферритах. Теоретически получено, что потенциальные возможности тонких магнитных пленок с точки зрения быстродействия лежат в наносекундном диапазоне.

Проблемы, возникающие при использовании пленочных магнитных элементов, заключаются в следующем Выходное напряжение на линии считывания очень мало и поэтому может быть сравнимо с шумами системы. Механические удары могут изменить намагничивание пленок. Для небольших систем памяти трудно подобрать соответствующие активные и пассивные элементы в цепях записи и считывания, которые были бы расположены на одной подложке с запоминающими элементами. Последняя проблема может быть решена созданием на одной подложке с памятью тонкопленочных резисторов, конденсаторов и использованием дискретных полупроводниковых приборов для изготовления необходимых функциональных схем.

Использование специальной схемотехники позволяет строить на тонкопленочных магнитных приборах цифровые логические элементы и магнитные усилители мощности. Однако ограниченные возможности технологии тонких магнитных пленок в этих областях по сравнению с тем, что дает использование полупроводников и обычной тонкопленочной технологии, существенно ограничивают применение магнитных пленочных схем.

ВОПРОСЫ

1. **Большинство магнитных пленок изготавливается на основе сплава . . . .**
2. **Способы осаждения магнитных пленок включают . . . . и . . . . осаждение.**
3. **Тонкопленочная память имеет потенциально небольшую стоимость, так как . . . . отдельных запоминающих элементов может быть получено одновременно.**
4. **Пленочная магнитная память требует для переключения меньшего количества энергии по сравнению с ферритовыми кольцами и имеет потенциально большее . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Большинство магнитных пленок изготавливается на основе сплава **никель — железо.**
2. Способы осаждения магнитных пленок включают **испарение, распыление** и **химическое** осаждение.
3. Тонкопленочная память имеет потенциально небольшую стоимость, так как **соединение** отдельных запоминающих элементов может быть получено одновременно.
4. Пленочная магнитная память требует для переключения меньшего количества энергии по сравнению с ферритовыми кольцами и имеет потенциально большее **быстродействие.**

5-5. КРИОГЕННЫЕ ПЛЕНКИ

Сверхпроводимость. Проводимость большинства проводников увеличивается при уменьшении температуры. Это связано с уменьшением амплитуды колебаний атомов и, следовательно, меньшим рассеянием потока электронов. Удельное электрическое сопротивление меди при низких температурах лежит в диапазоне 10^{-8} Ом·см. Однако существует множество материалов, в которых при температуре вблизи нуля Кельвина наблюдается внезапное уменьшение удельного сопротивления практически до нуля. Соответствующая температура называется критической температурой. Сопротивление, конечно, не может быть равно точно нулю, но оно так мало, что не может быть измерено. Измерения, сделанные на первых сверхпроводящих материалах, дали результат 10^{-22} Ом·см, что на 14 порядков меньше удельного электрического сопротивления меди. Известны более 20 элементов, имеющих сверхпроводимость при низких температурах. Их критическая температура лежит в диапазоне ниже 1 и выше 9 К. Некоторые типичные величины критических температур следующие: 7,1 К для свинца; 3,72 К для олова; 0,39 К для титана и 9,09 К для ниобия. Сплавы, так же как и чистые металлы, могут

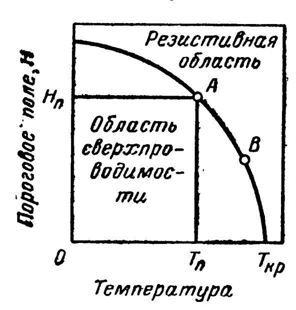


Рис. 5-37. Изменение порогового поля с температурой.

обладать сверхпроводимостью Сплав ниобия и олова имеет критическую температуру 18 К.

Явление сверхпроводимости исчезает при приложении магнитного поля (рис. 5-37) Величина магнитного поля при заданной температуре, начиная с которой сверхпроводимость исчезает, называется пороговым полем. Например, точке A на рисунке соответствует температура $T_п$ и величина поля $H_п$. Если поле становится выше значения $H_п$, то сверхпроводимость переходит в обычное сопротивление. Если магнитное поле имеет величину, соответствующую точке B, то сверхпроводимость будет существовать при более высоких температурах.

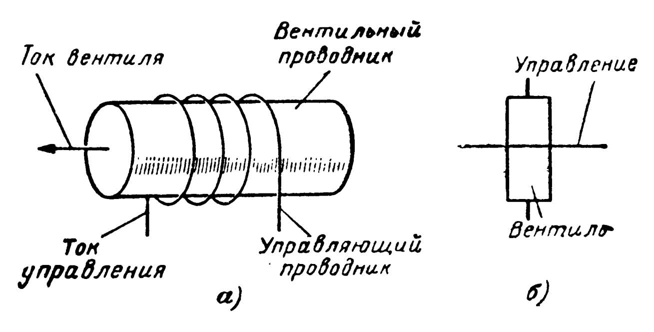


Рис. 5-38. Криотрон.

а — структура; *б* — схематическое изображение.

Явление сверхпроводимости и гасящее действие магнитного поля были использованы для создания нового схемного элемента — криотрона (рис. 5-38, *а*). Он состоит из двух сверхпроводящих элементов, расположенных в непосредственной близости один от другого. Ток, протекающий через управляющий провод, индуцирует магнитное поле, интенсивность которого достаточна для перевода вентильного элемента в резистивную область. Поэтому ток вентиля может изменяться таким же образом, как и через обычное реле. Схематическое изображение криотрона показано на рис. 5-38, *б*. Управляющий элемент криотрона обычно изготавливается из материала, имеющего более высокую критическую температуру, чем вентильный элемент. Кроме того, диаметр управляющего провода делается меньше диаметра вентильного проводника. Эти два фактора позволяют управляющему элементу индуцировать магнитное поле, достаточное для переключения вентильного элемента, но самому оставаться в сверхпроводящей области. Соответствующий выбор материала и его формы делают возможным управление большими токами в вентиле при помощи небольших управляющих токов. Поэтому в криотроне имеет место усиление тока.

На рис. 5-39 показана структура криотрона, изготовленного по тонкопленочной технологии. Прибор изготовляется последовательным напылением свинца, моноокиси кремния, олова, снова моноокиси кремния и свинца. Получение сверхчистых слоев достигается использованием нескольких испаряющихся источников внутри вакуумной камеры и сменой механических масок без нарушения вакуума.

На рис. 5-40 показано соединение двух криотронов для получения элемента, выполняющего логическую функцию И. Ток в сигнальной цепи не прекращается до тех пор, пока оба элемента не будут блокированы. Логическая функция ИЛИ может быть реализована последовательным соединением криотронов. Таким образом, на одной подложке могут быть получены основные логические функции, используемые в вычислительных машинах.

Мощность, рассеиваемая криотронными схемами, пренебрежимо мала. Криотроны могут работать со скоростью переключения до 10 МГц и рассеивать мощность меньше 1 мкВт. Однако несмотря

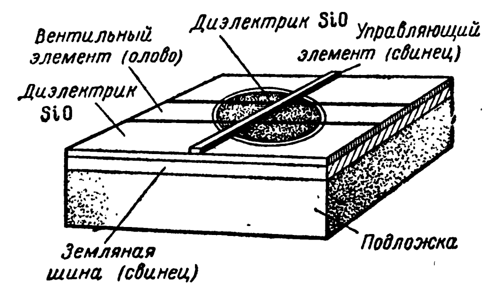


Рис. 5-39. Тонкопленочный криотрон.

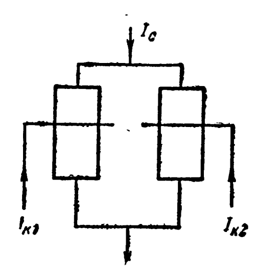


Рис. 5-40. Криотронный логический элемент.

на малую рассеиваемую мощность и малые размеры самого криотрона, охладительные системы, обеспечивающие получение необходимой температуры, потребляют много энергии и достаточно громоздки, поэтому в целом криогенные системы громоздки и рассеивают большую мощность.

ВОПРОСЫ

1. Тонкопленочные приборы могут изготовляться несколькими технологическими способами.

Тонкопленочные элементы изготовляются вакуумным . . . . , ... , и химическим способом.

2. Применение тонкопленочной технологии позволяет получить малые размеры и высокое качество некоторых часто используемых элементов. Однако изготовление ряда электронных элементов при использовании тонкопленочных способов встречает трудности.

а) Тонкопленочная технология может успешно применяться для изготовления высококачественных . . . . и . . . . , но имеет ограниченное применение при создании . . . . и . . . .

б) Тонкопленочные резисторы более . . . . и имеют более широкий диапазон номиналов по сравнению с полупроводниковыми . . . . . . резисторами.

ОТВЕТЫ

1. Тонкопленочные элементы изготовляются вакуумным **испарением, распылением** и химическим способом.
2. а) Тонкопленочная технология может успешно применяться для изготовления высококачественных **резисторов и конденсаторов**, но имеет ограниченное применение при создании **транзисторов и катушек индуктивности.**
   б) Тонкопленочные резисторы более **стабильны** и имеют более широкий диапазон номиналов по сравнению с полупроводниковыми **диффузионными** резисторами.

Глава шестая

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

С чем Вы познакомитесь в этой главе. Максимальная степень интеграции в настоящее время достигнута при использовании технологии полупроводниковых интегральных схем. Эта технология позволяет изготовлять как транзисторы, так и пассивные элементы, т. е. все необходимые элементы для выполнения электронных функций. Использование интегральной технологии открывает возможность получения целой схемы на небольшом кристалле полупроводникового материала.

В главе рассматривается применение полупроводниковой технологии для целей микроэлектроники, описаны природа и электронные свойства используемых материалов, рассмотрены методы и технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов. Проведен обзор структурных модификаций основных полупроводниковых приборов и показано развитие технологических приемов их изготовления. Помимо требований, предъявляемых к отдельным элементам, описаны способы изготовления целых схем, выполняющих определенные функции, и рассмотрены дополнительные проблемы, возникающие при этом. Обсуждены техника герметизации и экономические вопросы при изготовлении полупроводниковых интегральных схем.

6-1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Полупроводники. Классификация материалов на проводники, диэлектрики и полупроводники основывается на их способности проводить электрический ток и различии в характере изменения проводимости этих материалов от температуры. Протекание электрического тока через вещество обусловлено направленным движением электронов. Не все электроны отдельных атомов участвуют в проводимости, так как большинство из них располагаются вблизи атома, притягиваясь положительно заряженным ядром. Однако некоторые электроны на внешней оболочке атомов могут приобретать энергию, достаточную для разрыва связей с ядром, и свободно двигаться. Энергия, соответствующая такому свободному движению, называется уровнем проводимости. На рис. 6-1 показано расположение электронов по энергиям в металлах, диэлектриках и полупроводниках.

Заштрихованные области соответствуют уровням энергии, которые могут занимать электроны. Верхний уровень заштрихованных областей соответствует максимальной энергии электронов в кристалле. В металле значительная часть электронов располагается выше уровня проводимости и поэтому может участвовать в электропроводности В диэлектриках между уровнем электронов с высокой энергией и уровнем проводимости находится широкая запрещенная зона. Расположение энергетических уровней в полупроводниках аналогично

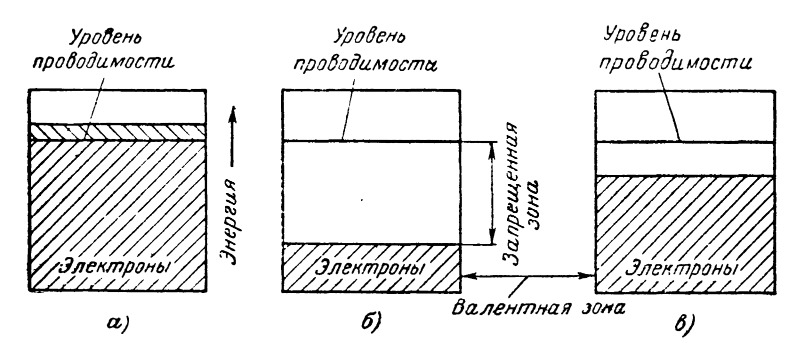


Рис. 6-1. Энергетические уровни электронов в кристаллах.
а — металл; *б* — диэлектрик; *в* — полупроводник,

диэлектрикам, но ширина запрещенной зоны в этом случае существенно уже. Запрещенная зона в германии составляет 0,7 эВ, а в кремнии 1,1 эВ. Ширина этих зон достаточна для того, чтобы некоторое количество электронов за счет тепловой энергии переходило через запрещенную зону на уровень проводимости. Эти электроны могут двигаться при протекании тока. Когда электроны покидают валентную зону и переходят на уровень проводимости, то в валентной зоне остаются свободные уровни или «дырки». Дырка эквивалентна свободному положительному заряду и участвует в электропроводности наряду с электроном. При повышении температуры число электронов, достигающих зоны проводимости, увеличивается и образуется большее число дырок, поэтому проводимость полупроводника возрастает. Температурная зависимость проводимости металла имеет противоположный характер. В металле всегда имеется достаточное количество свободных носителей заряда и увеличение колебаний атомов с ростом температуры приводит к более интенсивному рассеянию потока электронов, что вызывает увеличение сопротивления, т. е. уменьшение проводимости. Удельное электрическое сопротивление проводников составляет миллионные доли Ом·см. Диэлектрики имеют сопротивление порядка

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

Рис. 6-2. III, IV и V группы периодической системы элементов.

10^{15} Ом·см, в то время как удельное электрическое сопротивление полупроводниковых материалов лежит в диапазоне от одной сотой до сотен единиц Ом·см.

Полупроводниковые материалы, имеющие наиболее интересные с практической точки зрения свойства, располагаются в третьей, четвертой и пятой группах периодической системы элементов, как показано на рис. 6-2. Германий и кремний, относящиеся к четвертой группе, нашли очень широкое применение при изготовлении транзисторов. Соединения элементов третьей и пятой групп используются для создания специальных приборов, таких как туннельные диоды и инжекционные лазеры. Примерами таких материалов могут быть арсенид галлия, фосфид индия и антимонид индия

ВОПРОСЫ

1. **В металле имеется большое количество электронов, энергия которых превышает уровень . . . .**
2. **Сходство изоляторов и полупроводников состоит в том, что они имеют . . . . между уровнем электронов с высокой энергией и уровнем проводимости.**
3. **Запрещенная зона полупроводников у́же, чем у . . . .**

ОТВЕТЫ

1. В металле имеется большое количество электронов, энергия которых превышает уровень **проводимости.**
2. Сходство изоляторов и полупроводников состоит в том, что они имеют **запрещенную зону** между уровнем электронов с высокой энергией и уровнем проводимости.
3. Запрещенная зона полупроводников у́же, чем у **диэлектриков.**

Примесные полупроводники. Проводимость полупроводниковых материалов, таких как германий и кремний, может изменяться добавлением небольшого количества определенных примесей. Атомы этих полупроводников имеют четыре электрона на своей внешней оболочке. Устойчивое состояние всей кристаллической системы объясняется возникновением парных связей между электронами соседних атомов. Эти связи носят название ковалентных (рис. 6-3). На рис. 6-4, *а* показано введение в кристаллическую решетку кремния атома мышьяка. Атом мышьяка имеет приблизительно те же размеры, что и атомы кремния и поэтому может разместиться внутри кристаллической решетки без внесения заметных искажений. Все элементы пятой группы имеют пять валентных электронов на внешней оболочке. Четыре из них образуют сильные ковалентные связи, пятый же электрон может оторваться и стать свободным. Энергия ионизации этого электрона составляет несколько сотых электрон-вольта. Такая энергия достигается при комнатной температуре и поэтому каждый атом мышьяка вносит один свободный электрон,

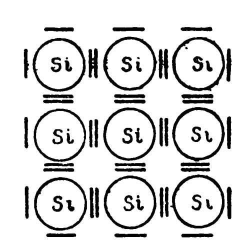


Рис. 6-3. Ковалентная связь между атомами кремния.

который может участвовать в электропроводности. Увеличение числа электронов таким образом происходит за счет легирования полупроводника, т. е. введения внешних примесей. Так как электроны имеют отрицательный заряд, то такой полупроводник носит название *n*-типа. Если в качестве легирующей примеси используется элемент третьей группы, то каждому атому примеси не будет хватать одного электрона для образования ковалентных связей. На рис. 6-4, *б* показан случай введения в германий примесного атома индия. «Дырки», появляющиеся в этом случае у каждого атома элемента третьей группы, будут проводить ток как положительные подвижные заряды.

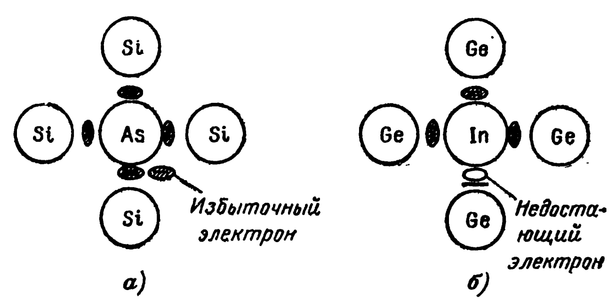


Рис. 6-4. Добавление легирующих примесей.
а — примесь *n*-типа; *б* — примесь *p*-типа.

Полупроводник в этом случае называется полупроводником *p*-типа. Примеси *n*-типа принято называть донорными, так как они «отдают» электроны. Примеси *p*-типа, вследствие того что они «захватывают» электроны, называют акцепторными примесями.

Если в полупроводник добавляются как донорные, так и акцепторные атомы, то они нейтрализуют друг друга, образуя компенсированный полупроводник. Для изменения проводимости полупроводника требуется очень небольшое количество легирующей примеси. Добавление нескольких стомиллионных долей примеси уменьшает удельное электрическое сопротивление кремния от нескольких сотен тысяч до 1 Ом·см.

ВОПРОСЫ

1 **Такие примеси, как мышьяк, сурьма и фосфор, отдают электроны и поэтому используются для получения полупроводников . . . . -типа.**
2 **Такие примеси, как индий, галлий и бор, захватывают электроны и поэтому используются для получения полупроводников . . . . -типа.**

ОТВЕТЫ

1. Такие примеси, как мышьяк, сурьма и фосфор, отдают электроны и поэтому используются для получения полупроводников *n*-типа.

2. Такие примеси, как индий, галлий и бор, захватывают электроны и поэтому используются для получения полупроводников p-типа.

Электрические параметры. Наиболее важными электрическими параметрами полупроводников с точки зрения проектирования и изготовления приборов являются их проводимость и время жизни неосновных носителей заряда. Чистые или «собственные» полупроводниковые материалы имеют очень большое удельное электрическое сопротивление, резко изменяющееся с изменением температуры.

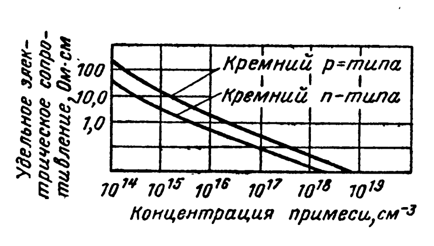


Рис. 6-5. Зависимость удельного электрического сопротивления кремния от концентрации примесей.

Рис. 6-6. Время жизни неосновных носителей.

Большинство же полупроводниковых приборов изготавливаются из материалов с удельным электрическим сопротивлением от одной сотой до сотни Ом·см. Такие сопротивления получаются созданием соответствующих концентраций легирующих примесей. На рис. 6-5 показано изменение удельного электрического сопротивления при легировании кремния. Сопротивление уменьшается обратно пропорционально концентрации вводимых примесных атомов приблизительно во всем рассматриваемом диапазоне. Связь удельного электрического сопротивления и концентрации имеет вид:

$$\rho = \frac{1}{q\mu N},$$

где q — заряд электрона; μ — подвижность; N — концентрация примесей.

Подвижность пропорциональна скорости, с которой свободные носители движутся в полупроводнике под действием внешнего электрического поля. Из рис. 6-5 видно, что сопротивление полупроводника n-типа при той же концентрации примеси меньше удельного электрического сопротивления полупроводника с дырочной проводимостью. Это объясняется тем, что подвижность электронов выше подвижности дырок. Разница в подвижности является результатом того, что квантовомеханические «эффективные» массы электронов и дырок различны.

В полупроводнике n-типа неосновными носителями являются дырки, а в материале p-типа — электроны. Если в полупроводнике присутствуют избыточные носители обоих знаков, то они рекомбинируют друг с другом, т. е. исчезают. На рис. 6-6 показано изменение избыточной концентрации неосновных носителей от C_1 до C_0. Умень-

шение происходит по экспоненциальному закону. Время жизни τ определяется как время, необходимое для уменьшения концентрации носителей от C_1 до величины, равной 37% от C_1. Для изготовления *р-п-р* и *п-р-п* транзисторов требуется вполне определенное время жизни. Чтобы получить необходимые значения подвижности и времени жизни, нужно использовать материалы с регулярной структурой. Вещества, атомы которых упорядочены в некоторую регулярную структуру, называются «монокристаллами», в отличие от обычных «поликристаллических» веществ.

ВОПРОСЫ

1. **Наиболее важными параметрами полупроводникового материала являются . . . . и . . . .**
2. **Удельное электрическое сопротивление материала *п*-типа при той же концентрации примесей ниже, чем сопротивление материала *р*-типа, вследствие более высокой . . . . электронов.**
3. **Для того чтобы получить необходимые значения подвижности и времени жизни, полупроводниковый материал должен изготовляться в виде . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Наиболее важными параметрами полупроводникового материала являются **удельное электрическое сопротивление** и **время жизни.**
2. Удельное электрическое сопротивление материала *п*-типа при той же концентрации примесей ниже, чем сопротивление материала *р*-типа, вследствие более высокой **подвижности** электронов.
3. Для того чтобы получить необходимые значения подвижности и времени жизни, полупроводниковый материал должен изготовляться в виде **монокристалла.**

6-2. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Электрические свойства большинства полупроводниковых приборов, используемых в схемах, зависят от свойств *р-п* перехода. На первый взгляд структура *р-п* перехода, изображенная на рис. 6-7, может быть получена простым соприкосновением пластины полупроводника *р*-типа (легирующая примесь бор) и пластины полупроводника *п*-типа (легирующая примесь мышьяк). Однако в этом случае невозможно получить совершенную кристаллическую структуру, обеспечивающую приемлемые электрические характеристики, из-за механических нарушений на границе соединения. Поэтому при изготовлении *р-п* переходов сначала берется пластина полупроводника, легированная одним типом примеси. Затем в определенные области вводится необходимое количество примеси противоположного типа, чтобы компенсировать исходную концентрацию и изменить тип проводимости полупроводника в этой области. *р-п* переход при этом образуется на границе двух областей. Существует несколько различных способов изготовления переходов.

Сплавление. На рис. 6-8 показано получение *р-п* перехода сплавлением. В качестве примеси *р*-типа используется индий, имеющий

низкую температуру плавления. Для формирования p-n перехода таблетка индия помещается на поверхность кристалла германия n-типа и нагревается до температуры примерно 450° С. Индий расплавляется и растворяется в германии, образуя насыщенный раствор. Температура процесса определяет глубину проникновения индия. При повышении температуры раствор индия поглощает большее количество германия и проникает глубже в исходную пластинку. При охлаждении системы начинается процесс рекристаллизации.

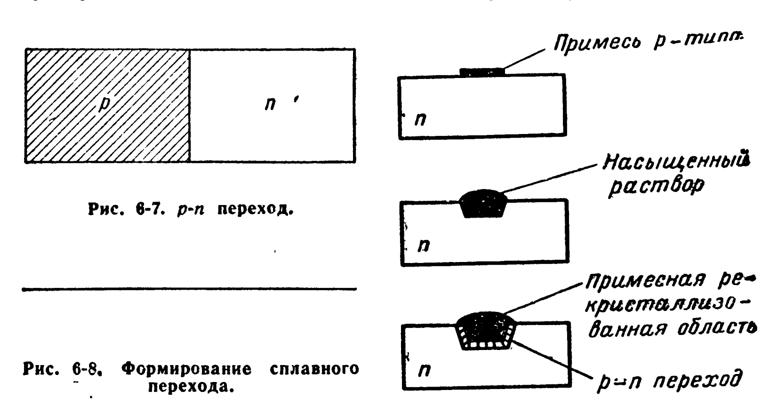


Рис. 6-7. *p-n* **переход.**

Рис. 6-8. Формирование сплавного перехода.

В образующейся при этом рекристаллизованной области будет содержаться большое количество захваченных атомов индия и эта область будет иметь проводимость p-типа. Таким образом, получается p-n переход. На глубину перехода, образованного таким образом, влияют такие факторы, как температура вплавления, количество легирующей примеси и растекание расплава по поверхности пластины. Сплавной переход имеет резкую границу между областями p- и n-типов.

ВОПРОСЫ

1. **Изготовление полупроводниковых приборов для использования в электронике требует получения . . . .**
2. **Наиболее важными факторами, влияющими на получение сплавного перехода, являются количество примеси, площадь перехода и . . . .**
3. **В сплавном переходе граница между p и n-областями . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Изготовление полупроводниковых приборов для использования в электронике требует получения p-n **переходов.**
2. Наиболее важными факторами, влияющими на получение сплавного перехода, являются количество примеси, площадь перехода и **температура вплавления.**

3. В сплавном переходе граница между p- и n-областями резкая.

Диффузия. Если полупроводник при высокой температуре поместить в атмосферу, содержащую атомы какой-либо примеси, то примесные атомы будут соударяться с поверхностью полупроводника и захватываться свободными ловушками, имеющимися в кристал-

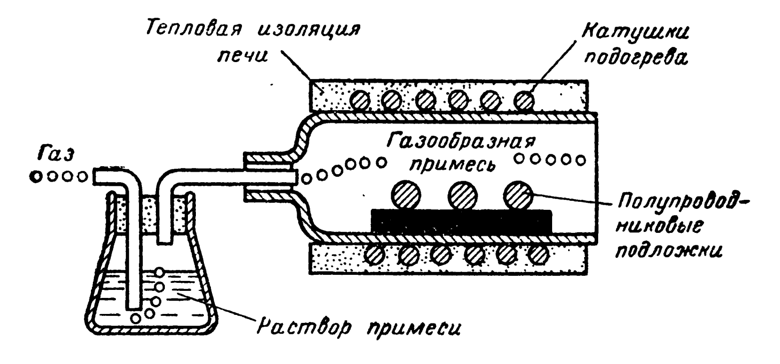


Рис 6-9. Диффузионная система.

лической структуре вблизи поверхности. За счет этого на поверхности полупроводника образуется сильно легированный примесный слой. Если процесс длится достаточно долго, то атомы примеси будут двигаться от поверхности в глубь полупроводника. Поддерживая концентрацию примесей на поверхности при данной температуре ниже величины, достаточной для получения сплава примесь — полупроводник, можно избежать нарушения кристаллической структуры исходной пластины. Таким образом, подбирая необходимую концентрацию примеси и окружающую температуру, можно осуществить легирование полупроводника. Этот процесс носит название диффузии в твердое тело. На рис. 6-9 показана установка для легирования кремниевых полупроводниковых подложек с помощью диффузии. Подогрев подложек до нужной температуры осуществляется катушками подогрева, окружающими кварцевую печь. Газ, в качестве которого чаще всего используется аргон, азот и кислород, насыщается парами примеси при прохождении через систему «пробулькивания», как показано на рисунке. Концентрация примеси в газе-носи-

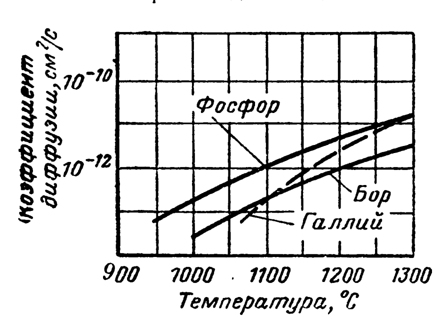


Рис. 6-10. Изменение коэффициента диффузии с температурой.

теле определяет концентрацию легированного слоя на поверхности полупроводниковых пластин. Для проведения диффузии *р*-типа в качестве раствора используется трехбромистый бор, а для получения слоев, легированных донорными примесями — раствор оксохлорида фосфора. Концентрация примеси на глубине *X* от поверхности полупроводника определяется с помощью специальных математических соотношений, в которые входят такие величины, как поверхностная концентрация C_0, постоянная *D*, называемая коэффициентом диффузии, и время диффузии. Эти соотношения достаточно сложны и нет необходимости останавливаться на них подробно, но весьма полезно рассмотреть основные диффузионные параметры, к которым относятся поверхностная концентрация, время и коэффициент диффузии.

Коэффициент диффузии *D* определяет скорость, с которой атомы примеси проникают в полупроводник. На рис. 6-10 показана довольно сильная зависимость коэффициента диффузии от температуры. При температурах ниже 900° С скорость диффузии пренебрежимо мала. Для высоких температур скорость велика и для точного контроля глубины проникновения требуется поддержание температуры с точностью ±1° С.

ВОПРОСЫ

1. **Проникновение атомов примеси в полупроводник при диффузии происходит без нарушения .... материала.**
2. **Для проведения диффузии полупроводниковая пластина помещается в атмосферу, содержащую легирующую примесь, при ....**
3. **Скорость, с которой атомы примеси диффундируют в полупроводник, пропорциональна .... примеси.**

ОТВЕТЫ

1. Проникновение атомов примеси в полупроводник при диффузии происходит без нарушения **кристаллической структуры** материала.
2. Для проведения диффузии полупроводниковая пластина помещается в атмосферу, содержащую легирующую примесь, при **высокой температуре.**
3. Скорость, с которой атомы примеси диффундируют в полупроводник, пропорциональна **коэффициенту диффузии** примеси.

Глубина проникновения примеси в полупроводник зависит от трех переменных: поверхностной концентрации C_0, времени диффузии и температуры, при которой проводится диффузия. На рис. 6-11 показано влияние этих факторов на профиль распределения примеси с глубиной. Сплошная кривая соответствует распределению примеси при постоянной поверхностной концентрации C_{01}, температуре T_1 и длительности диффузии t_1. Если температура уменьшается, а время диффузии сокращается, то профиль примеси становится более крутым. Соответствующая кривая показана пунктирной линией. Если теперь зафиксировать величины T_2 и t_2, но уменьшить поверхностную концентрацию C_{02}, то диффузионный профиль изменится и

будет иметь вид кривой, изображенной точками. Последние две кривые имеют одинаковую форму и отношение концентраций для данной глубины проникновения будет равно отношению C_{01} и C_{02}.

На рис. 6-12 поясняется образование *p-n* перехода при использовании диффузионного метода. Будем считать, что в качестве исходного материала выбран кремний *n*-типа с удельным электрическим сопротивлением 5 Ом·см. Это соответствует концентрации примесей *n*-типа, примерно равной 10^{15} см$^{-3}$. Горизонтальная линия на рисунке показывает равномерное легирование исходной пластины по всей толщине. Если кремний поместить в диффузионную печь, содержащую такое количество атомов бора, что на поверхности пластины

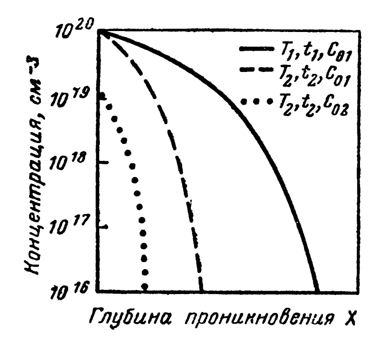


Рис. 6-11. Диффузионные параметры.

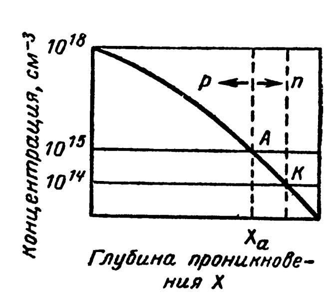


Рис. 6-12. Образование *p-n* перехода.

образуется концентрация 10^{18} см$^{-3}$, то распределение примеси *p*-типа внутри пластины будет иметь вид, показанный на рис. 6-12. В приповерхностной области концентрация бора много больше исходной концентрации донорной примеси, поэтому эта область будет иметь проводимость *p*-типа. Глубоко внутри пластины концентрация бора равна нулю и проводимость остается исходной, т. е. *n*-типа. В некоторой промежуточной точке X_a концентрация диффундирующего бора будет равна исходной концентрации доноров Поэтому кремниевая пластина до этой точки будет иметь дырочную проводимость, а дальше проводимость изменяет знак и становится электронной, т. е. *p-n* переход располагается на глубине X_a. Глубина залегания перехода зависит от профиля распределения диффундирующей примеси и исходной концентрации в пластине. Например, если исходная концентрация доноров была бы равна 10^{14} см$^{-3}$, то переход образовался бы на глубине, соответствующей точке *K*, т. е. дальше от поверхности.

ВОПРОСЫ

1. **При проведении диффузионного процесса необходимо контролировать три параметра: . . . . примеси, ... процесса и . . . . диффузии.**
2. **Если примесь *p*-типа диффундирует в полупроводник *n*-типа или примесь *n*-типа диффундирует в полупроводник *p*-типа, то *p-n* переход образуется в том месте, где концентра-**

ция диффузанта . . . . исходной концентрации примеси в подложке.

ОТВЕТЫ

1. При проведении диффузионного процесса необходимо контролировать три параметра: **поверхностную концентрацию** примеси, **температуру** процесса и **время** диффузии.
2. Если примесь *p*-типа диффундирует в полупроводник *n*-типа или примесь *n*-типа диффундирует в полупроводник *p*-типа, то *p-n* переход образуется в том месте, где концентрация диффузанта **равна** исходной концентрации примеси в подложке.

Окисление. Двуокись кремния, имеющая стекловидную структуру, образуется при соединении кремния с кислородом. Выращивание

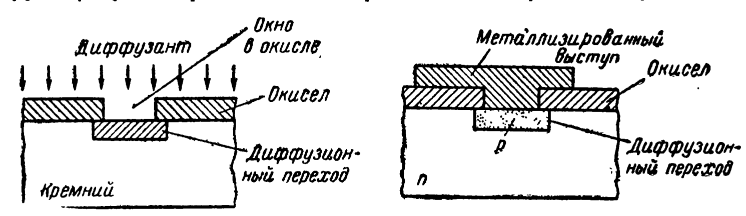


Рис. 6-13. Использование окисла в качестве маски.

Рис. 6-14. Изоляция с помощью окисла.

окисного слоя на кремниевой пластине осуществляется несколькими способами, простейший из которых состоит в том, что пластина помещается в диффузионную печь и нагревается в атмосфере кислорода или пара. Двуокись кремния обладает двумя очень важными свойствами с точки зрения использования ее в производстве кремниевых приборов. Прежде всего — это диэлектрик и поэтому может использоваться для изоляции металлизированного слоя, нанесенного на поверхность окисла, от диодов и транзисторов, расположенных в объеме полупроводника под окислом. Во-вторых, двуокись кремния является непроницаемой для многих легирующих примесей, используемых при изготовлении полупроводниковых приборов, и поэтому может успешно использоваться в качестве маски для создания требуемой формы диффузионных структур (рис. 6-13). После окисления всей поверхности кремниевой пластины в определенных участках окисел удаляется, в результате чего образуются так называемые «окна». При диффузии атомы примеси проникают только в открытые участки поверхности кремния, т. е. диффузия проходит локально. Возможность гибкого контроля формы рисунка диффузионных структур является важнейшим фактором при создании кремниевых полупроводниковых элементов в интегральных схемах. Толщина окисла, достаточная для защиты от проникновения диффузанта, составляет от 100 до 1000 нм и зависит от температуры и длительности процесса диффузии, а также от вида примеси. На рис. 6-14 показано использование изолирующего свойства двуокиси кремния. В этом примере металлический контакт к *p*-области имеет размер,

превышающий размер перехода. Окисная изоляция позволяет сделать это без закорачивания *p* и *n*-областей. Применение же больших размеров контактных площадок облегчает ручные операции при сборке приборов. Кроме того, использование окисной изоляции позволяет изготавливать сверхвысокочастотные полупроводниковые приборы, так как в этом случае возможно получение надежных контактов к областям менее одной тысячной миллиметра.

ВОПРОСЫ

1. **Окисел образуется на пластинках кремния, помещенных при высокой температуре в атмосферу . . . . или . . . .**
2. **Двуокись кремния имеет два важных свойства, которые позволяют использовать ее в качестве . . . . для защиты при диффузии и как . . . .**
3. **Изготовление высокочастотных полупроводниковых приборов возможно при использовании изолирующего свойства двуокиси кремния для получения контактов к . . . . областям приборов.**

ОТВЕТЫ

1. Окисел образуется на пластинках кремния, помещенных при высокой температуре в атмосферу **кислорода или пара.**
2. Двуокись кремния имеет два важных свойства, которые позволяют использовать ее в качестве **маски** для защиты при диффузии и как **диэлектрик.**
3. Изготовление высокочастотных полупроводниковых приборов возможно при использовании изолирующего свойства двуокиси кремния для получения контактов к **малым** областям приборов.

Фотолитография. Получение или «вскрытие» окон в окисле для изготовления необходимой геометрической формы связано с рядом взаимосвязанных фотографических и химических операций. Процессы основаны на использовании светочувствительного свойства некоторых лаков, называемых фоторезистами. Как видно из рис. 6-15, пластинка предварительно окисленного кремния покрывается слоем фоторезиста толщиной в несколько сотен нанометров. Фотографическая маска (фотошаблон), в данном случае пластина стекла, имеющая рисунок в виде непрозрачных областей, располагается над фоторезистом и вся система засвечивается. Экспонированные области фоторезиста фиксируются (а области под непрозрачными участками фотошаблона остаются без изменения) и легко могут быть удалены путем химической обработки, образуя окна в слое фоторезиста (рис. 6-16, *а*). После этой операции пластина протравливается в разбавленном растворе соляной кислоты, в результате чего окисел в окнах фоторезиста растворяется и обнажается поверхность кремниевой пластины. Травление кремния слабым раствором кислоты не происходит. Результат этой операции показан на рис. 6-16, *б*. Оставшийся фоторезист удаляется с пластины механическим или химическим путем. Очищенная пластина (рис. 6-16, *в*) готова для проведения последующих операций диффузии или металлизации. При изготовлении маски особое внимание должно быть уделено отсутствию цара-

пин на непрозрачных участках рисунка. Такие царапины будут приводить к возникновению не полностью открытых окон, а темные пятна или грязь на светлых областях — к образованию нежелательных окон или «проколов» в окисле. Толщина фоторезиста и его вязкость выбираются из соображений обеспечения лучшей разрешающей способности вместе с достаточной химической стойкостью при травлении окисла. Современная техника фотографии позволяет получать

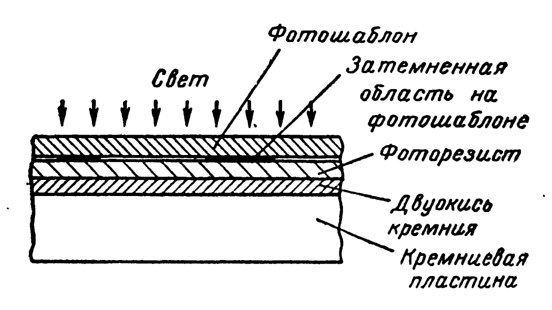


Рис. 6-15. Экспонирование рисунка на фоторезисте.

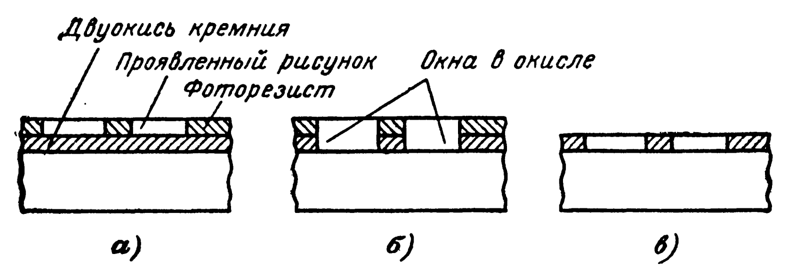


Рис. 6-16. Обработка фоторезиста.

а — проявление фоторезиста; *б* — травление окисла; *в* — очистка пластины.

линии толщиной менее 1 мкм. Эта точность в настоящее время приблизительно соответствует допускам при получении фотографических масок и прогресс в обеих областях приводит к непрерывному улучшению разрешающей способности фотолитографического процесса.

ВОПРОСЫ

1. **Образование окон в окисле для получения необходимого геометрического рисунка обеспечивается применением комбинации химических и фотографических операций, основанных на использовании фоточувствительных свойств некоторых лаков, называемых . . . .**
2. **Раствор соляной кислоты, используемый для травления окисла, не взаимодействует с резистом и открытыми областями . . . .**

3 **В процессе фотолитографии должны использоваться очень высококачественные маски и поддерживаться чистота для предотвращения получения полуоткрытых окон или «. . . . .» в окисле.**

ОТВЕТЫ

1. Образование окон в окисле для получения необходимого геометрического рисунка обеспечивается применением комбинации химических и фотографических операций, основанных на использовании фоточувствительных свойств некоторых лаков, называемых **фоторезистами**
2. Раствор соляной кислоты, используемый для травления окисла, не взаимодействует с резистом и открытыми областями **кремния.**
3. В процессе фотолитографии должны использоваться очень высококачественные маски и поддерживаться чистота для предотвращения получения полуоткрытых окон или **«проколов»** в окисле.

Металлизация. Металлизация необходима при изготовлении сплавных переходов, образовании низкоомных контактов и выполне-

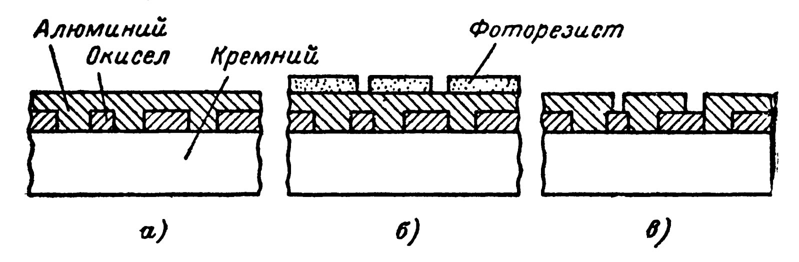


Рис. 6-17. Получение металлизированного рисунка.

а — осаждение алюминия; *б* — проявление рисунка; *в* — металлизированный рисунок.

нии соединений между элементами. В производстве интегральных схем используются лишь две последние операции. Применяется большое количество металлов и различных сплавов, таких как свинец, индий, золото, серебро, алюминий, титан, хром и молибден. За исключением метода прижимных контактов, используемого при изготовлении низкочастотных приборов со сплавными переходами, металлизированные слои изготовляются испарением, распылением или анодированием (см. гл. 4). Рисунок металлизированных слоев определяется металлическими и фоторезистивными масками, причем последние весьма эффективны для структур с малыми размерами. В кремниевых приборах, имеющих небольшие размеры, в качестве материала для металлизации чаще всего используется алюминий или золото. На рис. 6-17 показано изготовление алюминиевых контактов для транзисторной структуры. Прежде всего алюминий осаждается на всю пластину кремния для обеспечения контактов с соответствующими областями кремния через окна в окисле (рис. 6-17, *а*). Затем

наносится фотсрезист и после проявления удаляются ненужные области металла (рис. 6-17, *б*). Окончательный вид поперечного сечения прибора с металлизацией показан на рис. 6-17, *в*. Вид сверху на полученную металлизацию транзисторной структуры показан на рис. 6-18. Широкое использование алюминия для металлизации кремниевых приборов с небольшими размерами объясняется тем, что алюминий образует с кремнием низкоомный контакт, его соединение с двуокисью кремния достаточно прочное и алюминий остается мягким и ковким после всех технологических операций Последнее облегчает герметизацию приборов и изготовление межэлементных соединений. К недостаткам алюминия следует отнести трудность получения сплавных контактов с этим металлом, что несколько усложняет операции при соединении отдельных приборов.

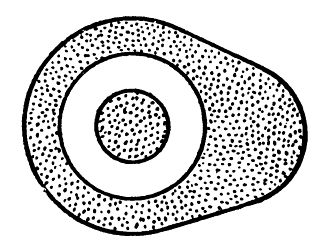


Рис. 6-18. Металлизация транзисторной структуры.

ВОПРОСЫ

1. **Металлизация используется в полупроводниковых приборах при изготовлении . . . . переходов, образовании . . . . контактов и выполнении . . . .**
2. **Для металлизации кремниевых структур с малыми размерами обычно используются . . . . или . . . .**
3. **Рисунок металлизированных слоев для приборов с малыми размерами задается с помощью . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Металлизация используется в полупроводниковых приборах при изготовлении **сплавных** переходов, образовании **низкоомных** контактов и выполнении **соединений**.
2. Для металлизации кремниевых структур с малыми размерами обычно используется **золото** или **алюминий**.
3. Рисунок металлизированных слоев для приборов с малыми размерами задается с помощью **фоторезиста**.

Эпитаксиальное наращивание. Диффузионный метод позволяет контролировать удельное электрическое сопротивление полупроводникового материала или даже изменять тип его проводимости. Однако природа диффузионного процесса такова, что при этом требуется высокая концентрация примесей на поверхности пластины, а убывание концентрации атомов примеси внутрь полупроводника происходит весьма резко. В то же время для широкого класса полупроводниковых приборов необходимо создание на подложке полупроводниковых пленок, имеющих равномерное распределение примесей. Это может быть выполнено с помощью эпитаксиального процесса. Эпитаксиальное наращивание применяется для широкого класса полупроводников, таких как германий, кремний и арсенид галлия. На рис. 6-19 показана установка для выращивания плен-

ки кремния на кремниевой подложке. Процесс основан на реакции между газообразным водородом и парообразным четыреххлористым кремнием. При высокой температуре эта химическая реакция имеет вид:

$$\underset{\text{четыреххлористый кремний}}{SiCl_4} + \underset{\text{газообразный водород}}{2H_2} \rightarrow \underset{\text{кремний}}{Si\downarrow} + \underset{\text{соляная кислота}}{4HCl}.$$

Продуктами реакции являются элементарный кремний, который осаждается на подложке, и газообразная соляная кислота, удаляемая из системы. Если подложка представляет собой монокристалл,

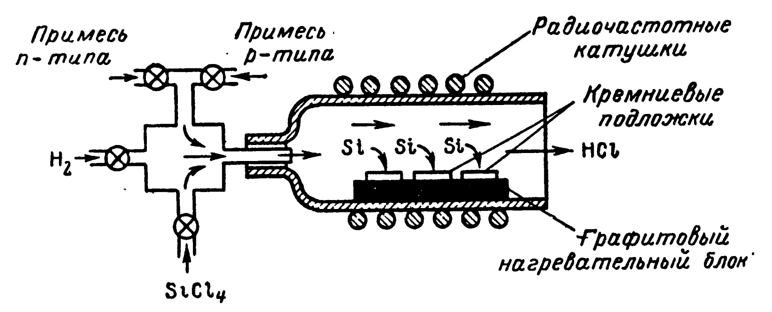


Рис. 6-19. Система эпитаксиального наращивания.

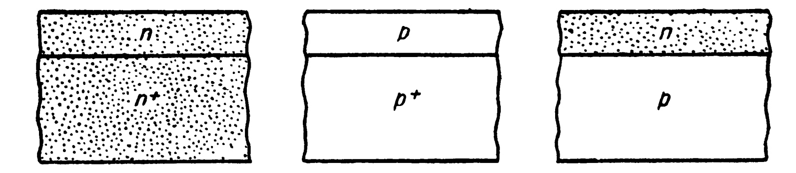


Рис. 6-20. Эпитаксиальные структуры.

то осаждаемый слой будет «надстраивать» кристаллическую структуру подложки и в результате наращивания будет получаться высококачественный кристаллический слой, который может быть использован для изготовления полупроводниковых приборов. Легирование выращиваемого слоя осуществляется введением в камеру вместе с газообразным водородом соединений, содержащих такие компоненты, как фосфор для получения *n*-проводимости или диборан (B_2H_6) — для получения проводимости *p*-типа. Эпитаксиальное осаждение кремния происходит при температуре выше 1000° С. Подогрев системы обычно выполняется генератором, работающим в радиочастотном диапазоне, который подогревает графитовый блок под кремниевыми пластинами. Скорость выращивания эпитаксиальных слоев обычно составляет около одного микрометра в минуту, а толщина слоев, используемых на практике, лежит в диапазоне от 1 до 10 мкм. Удельное электрическое сопротивление осаждаемых пленок может изменяться от одной сотой Ом·см до десятков Ом·см. На рис. 6-20 показаны некоторые типовые эпитаксиальные структуры. Знак «плюс»

означает очень высокую степень легирования полупроводника. Некоторые транзисторы требуют создания пленок *n*-типа с удельным электрическим сопротивлением около 1 Ом·см на подложке с удельным сопротивлением 0,001 Ом·см.

ВОПРОСЫ

1. **Использование диффузионного метода для легирования полупроводников ограничено тем, что проводимость примесного слоя резко изменяется с глубиной . . . . примесей в подложку.**
2. **Легирование эпитаксиальных слоев осуществляется введением в . . . . газов, содержащих легирующую примесь.**

ОТВЕТЫ

1. Использование диффузионного метода для легирования полупроводников ограничено тем, что проводимость примесного слоя резко изменяется с глубиной **проникновения** примесей в подложку.
2. Легирование эпитаксиальных слоев осуществляется введением в **камеру** газов, содержащих легирующую примесь.

Изготовление внешних выводов. Современная полупроводниковая технология позволяет изготавливать приборы с такими малыми размерами, что эффективное соединение их в электронные системы

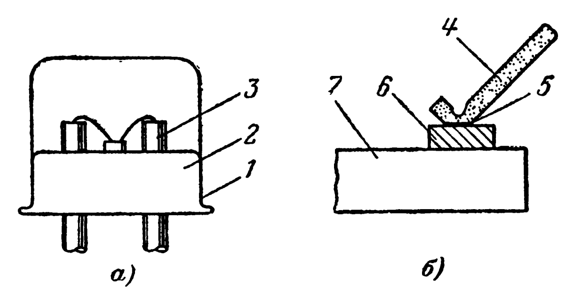


Рис. 6-21. Проволочная связь.

а — общий вид; *б* — структура термокомпрессионного соединения; *1* — колпачок корпуса; *2* — основание; *3* — выводы; *4* — золото или алюминий; *5* — компрессионное соединение; *6* — металлизированный выступ; *7* — полупроводник.

становится очень трудной операцией. Наиболее простое решение этой проблемы заключается в герметизации приборов в корпус с достаточным количеством выводов и соединении отдельных корпусов между собой с помощью метода погружения в припой. Для соединения контактных площадок приборов с внешними выводами используется специальная технология. На рис. 6-21, *а* приведен общий вид расположения выводов в корпусе при использовании обычной проволочной связи. На рис. 6-21, *б* показана структура отдельного со-

единения на кристалле кремния. В качестве провода обычно используется золотой или алюминиевый проводник диаметром от 25 до 75 мкм. Соединение провода с металлизированным выступом на подложке осуществляется за счет прижимания провода к кристаллу при температуре около 300° С или воздействия ультразвуковых колебаний от соответствующего генератора к месту соединения, что приводит к разрушению окислов и образованию соединения металл — металл при комнатной температуре. Эти два способа называются соответственно термокомпрессионным и ультразвуковым. Соединение выводов отдельных корпусов между собой может также выполняться этими способами. На рис. 6-22 и 6-23 показаны другие способы выполнения электрических соединений в полупроводниковых приборах. Метод «перевернутого монтажа» (рис. 6-22) основан на непосредственном присоединении пластинки кремния к металлизированному выступу

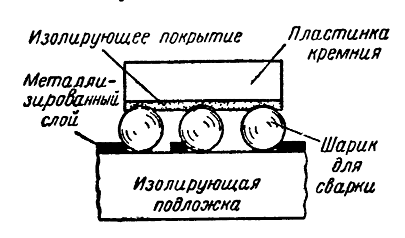


Рис. 6-22. Метод «перевернутого монтажа».

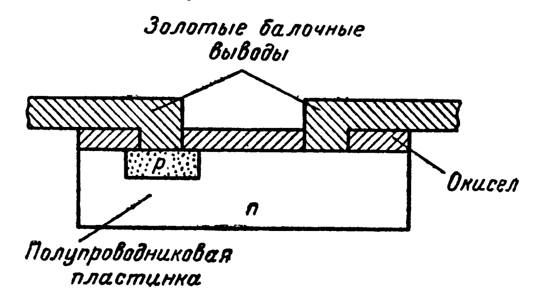


Рис. 6-23. Структура «балочных выводов».

на изолирующей подложке. Контакт к соответствующим областям прибора осуществляется через изолирующее покрытие с помощью металлических шариков. Соединения могут выполняться пайкой. Способ «балочных выводов» (рис. 6-23) заключается в изготовлении очень прочной металлизированной пластинки. Металлические «балки» выводятся наружу кристалла, и так как они делаются достаточно длинными и прочными, то могут служить не только как внешние выводы, но и как простые держатели, облегчая последующую сборку.

ВОПРОСЫ

1. **Термокомпрессионный и ультразвуковой способы являются примерами . . . . соединений.**
2. **Соединение кристалла кремния к металлизированной подложке может осуществляться методом « . . . .».**

ОТВЕТЫ

1. Термокомпрессионный и ультразвуковой способы являются примерами **проволочных соединений**.
2. Присоединение кристалла кремния к металлизированной подложке может осуществляться методом **«перевернутого монтажа»**.

6-3. ТРАНЗИСТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ

Основой всех биполярных транзисторов являются структуры, показанные на рис. 6-24. Это или полупроводник *n*-типа, заключенный между двумя слоями *p*-типа, или полупроводник *p*-типа между двумя областями с *n*-проводимостью. В обоих случаях образуются два *p-n* перехода Действие транзистора в таких структурах поясняется на рис. 6-25. Внешние области транзистора называются эмиттером и коллектором, внутренняя область — базой. Между эмиттером и базой прикладывается прямое смещение, поэтому ток в эмиттерной цепи может протекать при относительно малом напряжении. Германиевые переходы эффективно работают в прямом направлении при напряжении 0,4 В. В случае кремниевых структур требуется напряжение около 0,8 В. Открытый эмиттерный переход инжектирует неосновные носители в область базы: дырки — в базу *n*-типа или электроны — в базу *p*-типа. Эти носители и образуют ток от эмиттера к коллектору.

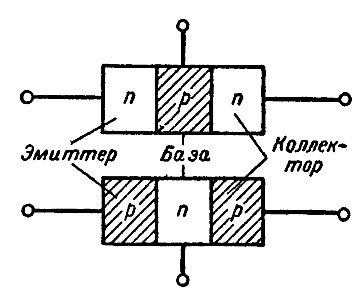


Рис. 6-24. Структура транзистора.

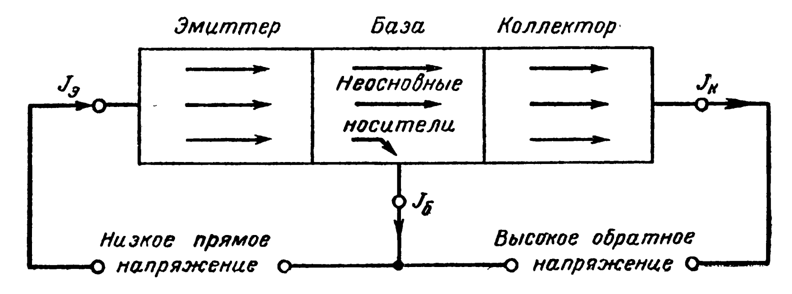


Рис. 6-25. Принцип действия транзистора.

Вследствие того что инжектированные носители являются неосновными в области базы, некоторые из них во время пролета через базу рекомбинируют с основными носителями, уменьшая ток коллектора и увеличивая ток в базовом электроде. Коллекторный переход имеет обратное смещение, поэтому ток через него может про-

текать только за счет носителей, поступающих из эмиттера. Коллекторное напряжение выбирается равным некоторой величине, меньшей напряжения пробоя перехода коллектор — база. Усиление мощности и возможность управления в транзисторной структуре достигается за счет того, что захват или экстракция носителей в коллекторном переходе происходит при высоком напряжении, тогда как инжекция возможна при малых значениях прикладываемого смещения.

Анализ работы транзистора показывает, что доля инжектированных носителей, достигающих коллектора, будет больше, если пространство между эмиттером и коллектором, т. е. ширина базовой области, будет уменьшаться. Кроме того, высокочастотные характеристики транзистора будут ограничены значением конечного времени диффузии носителей от эмиттера к коллектору. Эти две причины объясняют необходимость изготовления очень узких базовых областей. Транзистор в принципе является симметричным прибором. Если смещения эмиттерной и коллекторной областей изменить на противоположные, то эмиттер будет действовать подобно коллектору, а коллектор — подобно эмиттеру. В случае симметричного легирования и симметричной геометрии у прибора должны получаться одинаковые характеристики. В действительности, характеристики транзисторов обычно оптимизируются для одного включения за счет ухудшения параметров в противоположном направлении.

ВОПРОСЫ

1. **Структура биполярного транзистора состоит из двух полупроводниковых слоев одного типа проводимости, между которыми располагается слой с проводимостью .... типа.**
2. **Для получения хороших характеристик транзистора необходимо, чтобы бо́льшая часть носителей, инжектированных ...., достигала .... перехода.**
3. **Высокочастотные параметры транзистора ограничиваются .... базы**

ОТВЕТЫ

1. Структура биполярного транзистора состоит из двух полупроводниковых слоев одного типа проводимости, между которыми располагается слой с проводимостью **противоположного** типа.
2. Для получения хороших характеристик транзистора необходимо, чтобы бо́льшая часть носителей, инжектированных **эмиттером,** достигала **коллекторного** перехода.
3. Высокочастотные параметры транзистора ограничиваются **шириной** базы.

Сплавные транзисторы. Простейший способ изготовления транзисторов состоит в использовании сплавной технологии. Как показано на рис. 6-26, транзисторная структура *p-n-p*-типа получается путем вплавления двух индиевых *p*-областей в исходную пластинку германия *n*-типа, имеющую толщину 25—50 мкм. Расстояние между эмиттерной и коллекторной областями в этом случае составляет 12—15 мкм. Такие структуры могут работать на частотах не выше

10 МГц. Дальнейшее уменьшение ширины базы для сплавных транзисторов ограничено такими факторами, как разброс толщины исходной полупроводниковой пластины, допуск на температуру вплавления и разброс площадей переходов.

Диффузионные транзисторы. Многие ограничения, затрудняющие изготовление высокочастотных транзисторов методом сплавной технологии, могут быть сняты при использовании диффузии в твердое тело. На рис. 6-27 показана последовательность получения *n-p-n* транзистора способом диффузии. Исходная полупроводниковая подложка представляет собой пластину кремния *n*-типа, легированную сурьмой (рис. 6-27, *а*), в которую вводится тонкий слой примеси *p*-типа после помещения пластины при высокой температуре в атмосферу, содержащую бор (рис. 6-27, *б*). Затем пластина выдерживается при высокой температуре в атмосфере, содержащей донорную примесь фосфора (рис. 6-27, *в*). Условия диффузии фосфора таковы, что концентрация его на поверхности пластины превышает концентрацию бора, но глубина проникновения этой примеси меньше по сравнению с бором.

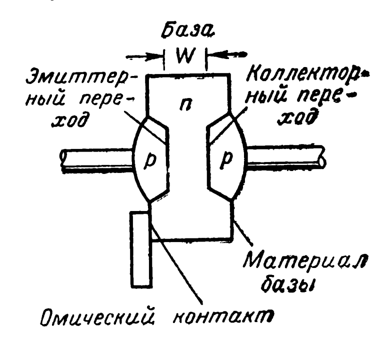


Рис. 6-26. Структура сплавного транзистора.

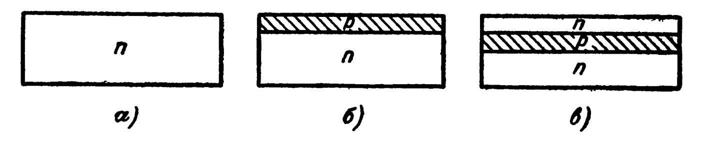


Рис. 6-27. Диффузионная *n-p-n* структура.

а — исходный материал; *б*—диффузия бора; *в* — диффузия фосфора.

Так как глубина проникновения диффундирующих примесей как *p*-, так и *n*-типа отсчитывается от поверхности, то толщина пластины полупроводника не влияет на расстояние между эмиттерным и коллекторным переходами. Глубина проникновения примеси зависит от соотношения между температурой и временем диффузии, поэтому, выбирая температуру не слишком высокой, можно увеличить требуемое для диффузии время и тем самым облегчить контроль этого параметра. Диффузионная технология позволяет получать транзисторы с граничной частотой свыше 1000 МГц. Расстояние между эмиттером и коллектором у таких приборов, как правило, составляет 1 мкм.

ВОПРОС

Сплавные транзисторы не могут работать на очень высоких частотах, так как точность технологических операций при сплавлении ограничивает минимальное значение . . . .

ОТВЕТ

Сплавные транзисторы не могут работать на очень высоких частотах, так как точность технологических операций при сплавлении ограничивает минимальное значение ширины базы.

Распределение примесей при диффузии. На рис. 6-28 показано распределение примесей в полупроводнике при образовании *n-p-n* транзистора. Исходная полупроводниковая кремниевая пластинка *n*-типа имеет концентрацию 10^{15} см$^{-3}$. Это соответствует удельному электрическому сопротивлению 4 Ом·см. После помещения пластины в атмосферу бора с поверхностной концентрацией, равной

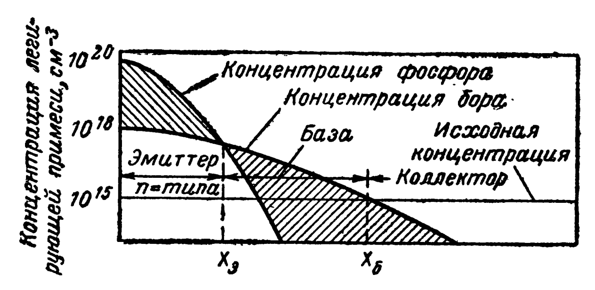


Рис. 6-28. Распределение легирующей примеси в *n-p-n* транзисторе.

10^{18} см$^{-3}$, область вблизи поверхности изменяет тип проводимости и становится областью *p*-типа. Протяженность этой области равна $X_б$ — глубине, на которой концентрация диффундирующих примесей уменьшается до значения 10^{15} см$^{-3}$, т. е. становится равной концентрации доноров в исходной полупроводниковой пластине.

Из рисунка видно, что при заданном значении удельного электрического сопротивления пластины глубина проникновения $X_б$ зависит от поверхностной концентрации и профиля распределения примеси. Если пластину после первой диффузии выдержать в атмосфере фосфора с поверхностной концентрацией 10^{20} см$^{-3}$, то атомы фосфора, проникающие в полупроводник, компенсируют ранее введенные атомы бора и пластина около поверхности снова изменит тип проводимости, став областью *n*-типа. Температура и время диффузии фосфора выбираются таким образом, чтобы уменьшение концентрации примеси *n*-типа с глубиной было гораздо резче, чем для случая диффузии бора. Поэтому в некоторой точке между поверхностью пластины и точкой $X_б$ концентрация атомов фосфора становится меньше концентрации примесных атомов *p*-типа, т. е. атомов бора. Это соответствует глубине проникновения, равной $X_э$. Таким образом, пластина будет иметь проводимость *n*-типа от поверхности до глубины $X_э$, проводимость *p*-типа между точками $X_э$ и $X_б$ и снова проводимость *n*-типа на глубине, превышающей $X_б$.

Диффузионный способ является очень эффективным способом создания чрезвычайно малых расстояний между эмиттерной и коллекторной областями, что необходимо для изготовления высокочастотных транзисторов. В стандартном диффузионном процессе величина $X_б$ равна 2,5 мкм, а глубина $X_э$ составляет 2,0 мкм. Результи-

рующая ширина базы равна 0,5 мкм, что трудно получить при использовании других технологических способов. В противоположность симметричному легированию для случая сплавного триода эмиттерный переход транзистора, полученного диффузионным способом, имеет более высокую степень легирования по обеим сторонам по сравнению с коллекторным переходом. В результате более сильного легирования пробивное напряжение эмиттерного перехода существенно меньше пробивного напряжения коллекторного перехода.

Диффузионный коллекторный переход может иметь пробивное напряжение несколько сотен вольт, в то время как средняя величина напряжения пробоя эмиттерного перехода составляет 5—10 В. Высокое легирование диффузионного эмиттерного перехода приводит к большему значению емкости эмиттера на единицу площади по сравнению со сплавной структурой. Практически недостатки диффузионных структур не столь важны, так как в большинстве случаев эмиттерный переход работает или при прямом смещении, или закрывается небольшим обратным напряжением. Использование же двуокиси кремния в качестве маски позволяет изготавливать очень малые площади эмиттерных переходов, что уменьшает результирующую величину эмиттерных емкостей, несмотря на высокую концентрацию примесей в переходе.

ВОПРОСЫ

1. **Точный контроль ширины базы в диффузионных структурах достигается за счет того, что глубина эмиттерного и коллекторного переходов отсчитывается от одной . . . .**
2. **Для создания диффузионной транзисторной структуры необходимо, чтобы поверхностная концентрация эмиттерной примеси была . . . . поверхностной концентрации базовой примеси, а уменьшение концентрации примеси эмиттера по глубине было гораздо . . . . по сравнению с примесью в базе.**

ОТВЕТЫ

1. Точный контроль ширины базы в диффузионных структурах достигается за счет того, что глубина эмиттерного и коллекторного переходов отсчитывается от одной **поверхности**.
2. Для создания диффузионной транзисторной структуры необходимо, чтобы поверхностная концентрация эмиттерной примеси была **выше** поверхностной концентрации базовой примеси, а уменьшение концентрации примеси эмиттера по глубине было гораздо **резче** по сравнению с примесью в базе.

Изготовление меза-транзисторов. Диффузионные процессы определяют распределение примесей по глубине, т. е. перпендикулярно к поверхности пластины. Необходимая форма рисунка в продольном направлении может быть получена с помощью ранее описанных способов фотолитографии и окисного маскирования. На рис. 6-29 показано использование этих способов для изготовления кремниевого меза-транзистора. Прежде всего в исходную пластину *n*-типа (рис. 29, *а*). проводится базовая диффузия атомов *p*-типа (рис. 6-29, *б*). На этом этапе не требуется применения масок, а в качестве диффузанта может использоваться бор или галлий. Затем на по-

верхности пластины выращивается окисел. Окисел покрывается фоторезистом, который засвечивается и проявляется. После «вскрытия» окон в окисле путем травления проводится диффузия фосфора для

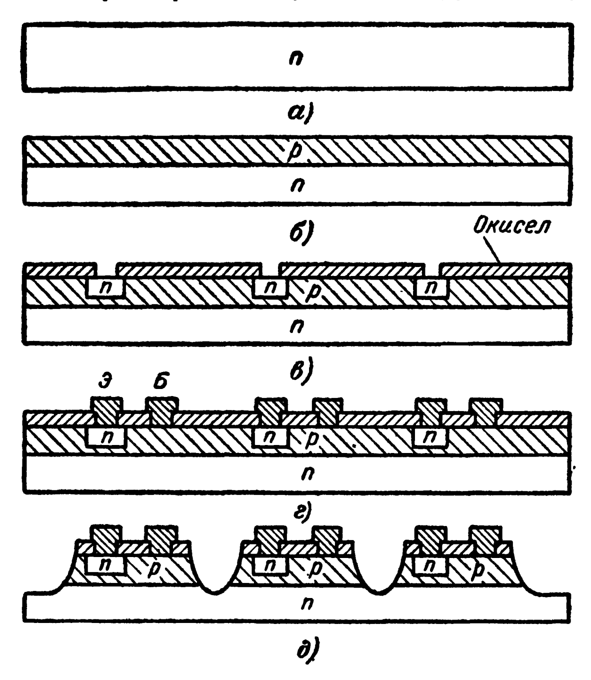


Рис. 6-29. Процесс изготовления меза-транзистора.

а — исходная пластина; *б* — базовая диффузия; *в* — эмиттерная диффузия; *г* — металлизация; *д* — образование меза-структур.

образования эмиттерных областей (рис. 6-29, *в*). Металлизация к областям эмиттера и базы получается с помощью выращивания нового изолирующего окисла и изготовления в нем соответствующих окон для контактов. Металл, например алюминий, серебро или золото, напыляется на поверхность всей пластины и удаляется с определенных участков способами фотолитографии (рис. 6-29, *г*). На этом этапе технологического процесса пластина представляет собой единый транзистор, имеющий очень длинный переход база — коллектор и множество эмиттерных переходов. Для получе-

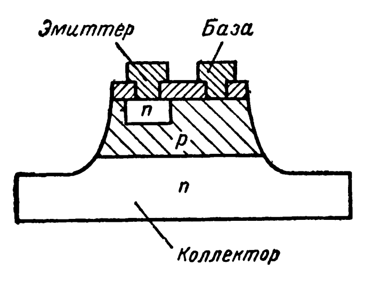


Рис. 6-30. Структура меза-транзистора.

ния отдельных приборов кремний подвергается травлению таким образом, чтобы удалить всюду *p*-слой, за исключением областей, непосредственно прилегающих к эмиттерному и базовому контактам (рис. 6-29, *д*). В результате получается структура отдельного транзистора, показанная на рис. 6-30. Термин меза-транзистор происходит от того, что внешний вид прибора — выступающая центральная часть с плоской вершиной — напоминает специфическую форму выступов, называемых мезами. При травлении мез уменьшается площадь перехода коллектор — база и, следовательно, получается малая коллекторная емкость.

ВОПРОСЫ

1. **Диффузионные процессы определяют размеры транзисторной структуры .... к поверхности пластины.**
2. **Форма транзисторов на поверхности пластины определяется .... и .... маскированием.**
3. **Травление меза-структур уменьшает площадь коллектора и, следовательно, снижает .... коллектор — база.**

ОТВЕТЫ

1. Диффузионные процессы определяют размеры транзисторной структуры **перпендикулярно** к поверхности пластины.
2. Форма транзисторов на поверхности пластины определяется **фотолитографией** и **окисным** маскированием.
3. Травление меза-структур уменьшает площадь коллектора и, следовательно, снижает **емкость** коллектор — база.

Структура планарного транзистора. Ограничение размеров базовой области без травления боковых областей может быть выполнено с помощью дополнительного окисления и изготовления соответствующих «окон» для проведения базовой диффузии. Получаемая в результате структура носит название планарного транзистора (рис. 6-31). Планарная структура имеет ряд преимуществ по сравнению с меза-структурой. Вместо глубокого, плохо контролируемого травления кремния в этом случае используется травление окисла. Загрязнение перехода во время технологических операций уменьшается, так как переход защищен окисной пленкой. С точки зрения конструкции прибора очень важно, что планарный транзистор располагается полностью вблизи поверхности полупроводниковой пластины и поэтому позволяет изготовлять контакты ко всем областям через специальные отверстия в окисле. Так как вся пластина, за исключением контактных окон, покрыта окисной пленкой, то контакты к областям эмиттера, коллектора и базы изготовляются во время операции металлизации. Размеры контактных площадок определяются необходимыми размерами для последующих операций сборки.

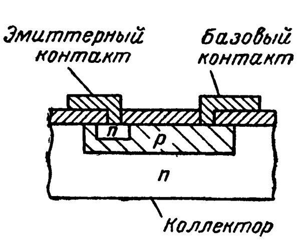


Рис. 6-31. Структура планарного транзистора.

Вследствие того что высокочастотные параметры транзисторов определяются размерами эмиттерных и коллекторных областей, а не площадью металлизированного слоя, то планарная технология позволяет изготовлять высокочастотные приборы, имеющие малые площади переходов и большие металлизированные области на окисле, достаточные для присоединения внешних выводов. Недостатком планарной структуры может быть низкое пробивное напряжение коллектора вследствие специфичности условий легирования коллекторного перехода у поверхности.

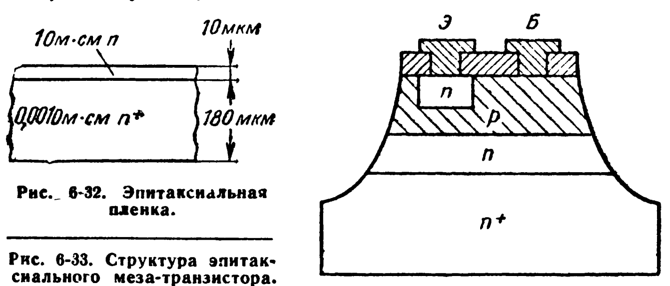


Рис. 6-32. Эпитаксиальная пленка.

Рис. 6-33. Структура эпитаксиального меза-транзистора.

Эпитаксиальные структуры. Минимальная толщина кремниевой пластины с точки зрения удобства работы с ней во время выполнения ручных операций составляет 180 мкм. Более тонкие пластины очень легко ломаются. Транзисторная же структура располагается на поверхности пластины, занимая пространство около 2,5—5 мкм глубиной. Поэтому кремниевая подложка в планарной и меза-структурах необходима только для обеспечения необходимой механической прочности при ручных операциях. Однако вместе с подложкой последовательно с транзистором включается последовательное сопротивление, которое может ухудшить высокочастотные параметры прибора и затруднить условия протекания тока через транзистор. Если удельное электрическое сопротивление исходной пластины мало, то увеличивается коллекторная емкость и уменьшается пробивное напряжение коллекторного перехода. Компромисс между низким сопротивлением и достаточным пробивным напряжением достигается путем использования эпитаксиальных пленок. На рис 6-32 показано поперечное сечение пластины кремния с эпитаксиальной пленкой. Удельное электрическое сопротивление подложки составляет одну тысячную долю ома на сантиметр. Эта величина вполне достаточна для изготовления высококачественных приборов. На подложке выращивается пленка толщиной около 10 мкм с удельным электрическим сопротивлением 1 Ом·см. Транзистор с необходимыми параметрами изготовляется в этой пленке. В результате пластина имеет достаточную механическую прочность, а область с большим сопротивлением занимает объем толщиной около 10 мкм.

На рис. 6-33 показано использование эпитаксиальной пленки для создания меза-транзистора. Структура аналогична планарной.

ВОПРОСЫ

1. **Планарный транзистор изготовляется путем применения дополнительного окисления и создания необходимых окон для проведения . . . . диффузии.**

2. **Одно из важных достоинств планарной структуры заключается в возможности создания металлизированного слоя над окислом, перекрывающим . . . . и . . . . переходы.**

ОТВЕТЫ

1. Планарный транзистор изготовляется путем применения дополнительного окисления и создания необходимых окон для проведения **базовой** диффузии.
2. Одно из важных достоинств планарной структуры заключается в возможности создания металлизированного слоя над окислом, перекрывающим **эмиттерный** и **коллекторный** переходы.

6-4. МОНОЛИТНЫЕ СХЕМЫ

При использовании планарной технологии на одной кремниевой пластине может быть размещено несколько тысяч отдельных приборов. Поперечное сечение одного транзистора показано на рис. 6-31. Эти транзисторы затем отделяются один от другого, индивидуально герметизируются и каждый из них соединяется с другими элементами и другими транзисторами для выполнения определенных функций. Соединение транзисторов на пластине, естественно, может привести к существенной экономии в количестве корпусов, сокращению объема затрачиваемых ручных операций и уменьшению размеров электронных систем. Для того чтобы на поверхности одной пластины можно было реализовать сложную функцию, необходимо выполнить дополнительные условия. Транзисторы, показанные на рис. 6-34, имеют общий коллектор. Поэтому для нормального функционирования какой-либо схемы следует обеспечить электрическую изоляцию между отдельными транзисторами. Кроме того, помимо транзисторов, необходимо изготовить на пластине и другие электронные элементы.

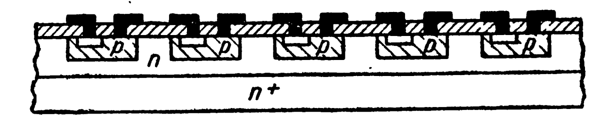


Рис. 6-34. Планарно-эпитаксиальная структура.

Изготовление электронной схемы на кремниевой подложке может быть разделено на три этапа: изоляция схемы, изготовление требуемых элементов и соединение этих элементов между собой.

Изоляция. На рис. 6-35 показано обеспечение электрической изоляции между *n*-областями на кремниевой пластине с помощью комбинации диффузионного и эпитаксиального методов. На исходном материале *p*-типа выращивается эпитаксиальная пленка *n*-типа толщиной от нескольких микрометров до 25 мкм. Затем пластина окисляется, обрабатывается фоторезистом и определенные участки окисла на поверхности подложки удаляются с помощью травления. После этого проводится продолжительная диффузия атомов *p*-типа. Глубина диффузии выбирается достаточной для того, чтобы полно-

стью перекрыть эпитаксиальную пленку и получить отдельные островки n-типа под слоем окисла. Таким образом изготовляются изолированные области n-типа в пластине с проводимостью p-типа. На рис. 6-36 иллюстрируется, каким образом эта структура обеспечива-

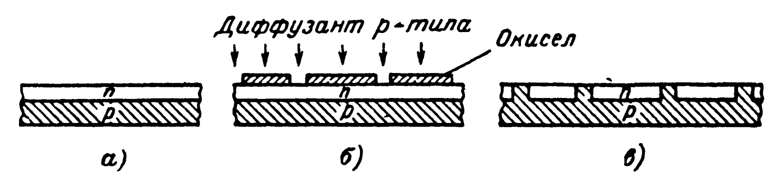


Рис. 6-35. Изолирующая диффузия.

а — исходный материал; *б* — окисленная пластина; *в* — после проведения диффузии.

ет электрическую изоляцию. Рассмотрим две соседние области n-типа. Подложка p-типа образует с каждой из них диод. Эти диоды включены навстречу друг другу, поэтому при любых электрических смещениях один из них всегда будет закрыт. Так как обратное сопротивление кремниевого диода составляет десятки мегом, то на низких частотах n-области надежно изолированы одна от другой. Существуют определенные недостатки этого вида изоляции. Диоды имеют емкости, через которые на высоких частотах осуществляется связь между изолированными областями и характеристики схемы ухудшаются. Другое ограничение связано с пробивным напряжением изолирующих диодов. Для обеспечения электрической изоляции

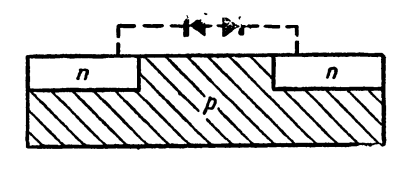


Рис. 6-36. Изоляция с помощью p-n перехода.

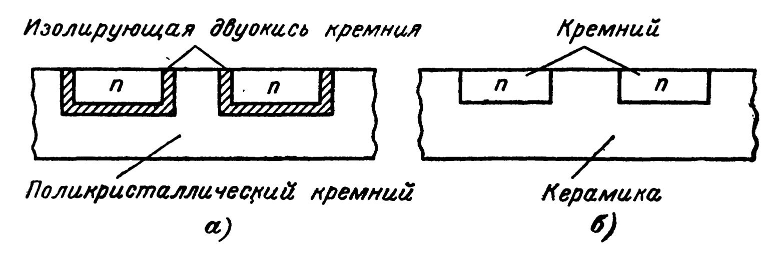


Рис. 6-37. Способы обеспечения изоляции.

а — с помощью окисла; *б* — с помощью керамики.

напряжение между n-областями необходимо поддерживать ниже этой величины.

На рис. 6-37 показаны другие способы обеспечения электрической изоляции между кремниевыми областями. Изоляция окислом

(рис. 6-37, *а*) заключается в применении травления, окисления и эпитаксиального наращивания для получения на поликристаллической основе отдельных *n*-островков монокристаллического кремния, окруженных изолирующей двуокисью кремния. Поликристаллический кремний осаждается под *n*-областями и между ними для обеспечения механической прочности всей конструкции. Использование комбинации травления и отжига керамики позволяет получать изоляцию, показанную на рис. 6-37, *б*. Оба эти способа обеспечивают величину пробивного напряжения в несколько сотен вольт и при одинаковых площадях изолирующих областей приводят к уменьшению паразитных емкостей более чем на порядок. Однако травление и наложение изолирующего слоя, необходимые для изготовления этих структур, затрудняют создание столь же малых изолированных областей, как в случае изолирующей диффузии. Кроме того, дополнительные технологические операции приводят к увеличению стоимости производства. С учетом этих факторов и благодаря изобретательности конструкторов в поисках схемотехнических путей уменьшения отрицательного влияния паразитных емкостей на работу электронных устройств, в настоящее время способ диодной изоляции является одним из наиболее широко используемых способов в производстве монолитных интегральных схем.

После создания изолированной области *n*-типа одним из описанных в этом разделе способом структура диффузионного планарного транзистора в этой области изготовляется теми же способами, что и в случае дискретного прибора.

ВОПРОСЫ

1. **Монолитные схемы требуют создания . . . . областей, изготовления внутри этих областей . . . . и их . . . .**
2. **Наиболее часто способ изоляции основан на использовании обратного сопротивления диффузионных . . . .**
3. **Недостатки изоляции с помощью *p-n* переходов связаны с относительно малым напряжением пробоя диодов и . . . . *p-n* переходов.**
4. **Эти проблемы могут быть решены при использовании в качестве диэлектрика . . . . или керамики.**
5. **Изоляция с помощью *p-n* переходов широко распространена вследствие технологической простоты этого способа и возможности получать . . . . по площади изолированные области.**

ОТВЕТЫ

1. Монолитные схемы требуют создания **изолированных** областей, изготовления внутри этих областей **элементов** и **их соединения.**
2. Наиболее часто способ изоляции основан на использовании обратного сопротивления диффузионных **диодов.**
3. Недостатки изоляции с помощью *p-n* переходов связаны с относительно малым напряжением пробоя диодов и **емкостями** *p-n* переходов.
4. Эти проблемы могут быть решены при использовании в качестве диэлектрика **двуокиси кремния** или керамики.

5. Изоляция с помощью *p-n* переходов широко распространена вследствие технологической простоты этого способа и возможности получать меньшие по площади изолированные области.

Изготовление элементов. Для выполнения электронных функций необходимы активные приборы — транзисторы и пассивные элементы — резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности. На рис. 6-38 показано, каким образом планарная технология может быть использована для изготовления резисторов и конденсаторов вместе с

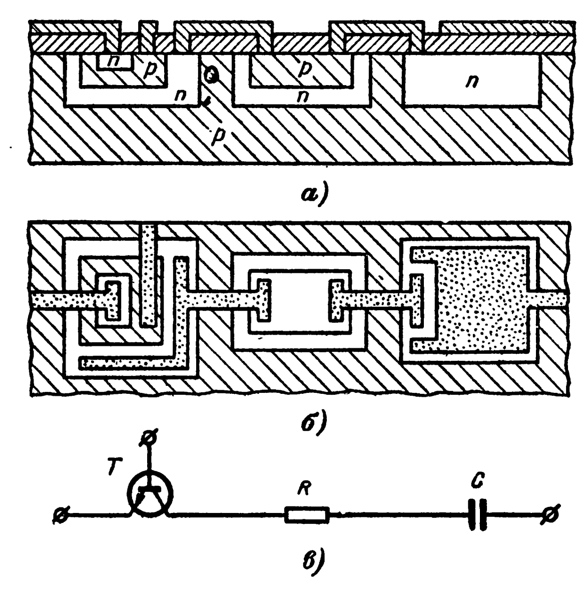


Рис. 6-38. Интегральные элементы.

а — поперечное сечение; *б* — вид сверху; *в* — элементы.

транзисторами. Поперечное сечение всех трех элементов показано на рис. 6-38, *а*. Транзисторная структура представляет собой обычный планарный *n-p-n* транзистор. Единственное отличие от дискретного прибора заключается в том, что вывод коллекторной области у интегральной структуры изготовляется сверху. Структура в центре рисунка получается с помощью тех же операций окисления и диффузии, которые необходимы для получения транзистора. Однако в этом случае окно в окисле над *p*-областью перед эмиттерной диффузией не вскрывается и примесь *n*-типа не проникает в область *p*-типа. Металлические контакты изготовляются на обоих концах *p*-области. Между этими контактами нет выпрямляющих переходов, поэтому структура аналогична обычному резистору.

Конденсатор (на рисунке справа) представляет собой два электрода, разделенных окисной пленкой, один из которых — диффузионная область *n*-типа, а другой — металлизированная область над

окислом. В качестве диэлектрика конденсатора используется двуокись кремния.

Вид сверху на структуру показан на рис. 6-38, *б*. Соединение отдельных элементов между собой (рис 6-38, *в*) осуществляется на этапе металлизации. Так как изолированные области приготовляются заранее, то получение резистивных и емкостных элементов проводится без дополнительных технологических операций, требуемых для создания планарного транзистора. Отличие состоит в том, что при изготовлении монолитной схемы должны использоваться более сложные фотошаблоны. Особенно сложный шаблон требуется при металлизации. При наличии таких фотошаблонов изготовление схемы практически эквивалентно изготовлению отдельного транзистора.

ВОПРОСЫ

1. **Планарная технология может быть использована для изготовления .... и .... так же успешно, как и для производства транзисторов.**
2. **Резистор *р*-типа формируется одновременно с .... областью транзистора.**
3. **Верхний электрод интегрального конденсатора формируется в процессе изготовления ....**

ОТВЕТЫ

1. Планарная технология может быть использована для изготовления **резисторов** и **конденсаторов** так же успешно, как и для производства транзисторов.
2. Резистор *р*-типа формируется одновременно с **базовой** областью транзистора.
3. Верхний электрод интегрального конденсатора формируется в процессе изготовления **межэлементных соединений**.

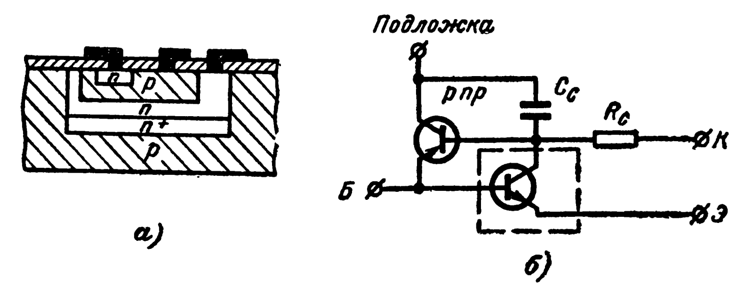


Рис. 6-39. Интегральный монолитный транзистор.
а — общая структура; *б* — эквивалентная схема.

Структура интегрального транзистора. На рис. 6-39, *а* показана структура *n-p-n* планарного транзистора, используемого в интегральных схемах. Как и в случае дискретного прибора, часть коллекторной области транзистора выполнена из высоколегированного материала n^+-типа для уменьшения последовательного коллекторного сопротив-

ления. Вследствие того что в интегральном транзисторе коллекторный ток протекает через меньший по площади верхний контакт, а не через широкий нижний контакт ко всей подложке, как в случае обычного транзистора, то сопротивление насыщения интегрального транзистора будет всегда выше, чем дискретного прибора при тех же размерах и том же распределении примесей. Другое принципиальное отличие интегрального и дискретного транзисторов связано с наличием изолирующего *p-n* перехода между подложкой и областью коллектора. Емкость этого перехода накладывает определенные ограничения на параметры интегрального транзистора. Кроме того, формирование *n-p-n* структуры на *p*-подложке сопровождается появлением «паразитной» *p-n-p* транзисторной структуры. Эмиттер *p-n-p* транзистора является базой *n-p-n* прибора, а его коллектором служит подложка. Присутствие *p-n-p* структуры в общем случае нежелательно и при проектировании интегральных схем должны быть приняты определенные меры для подавления ее действия. Транзистор *p-n-p* типа имеет обычно низкий коэффициент усиления. В некоторых схемах, где этот транзистор используется для выполнения специальных функций, коэффициент усиления *p-n-p* структуры может составлять величину от 1 до 5, но в подавляющем большинстве случаев следует поддерживать эту величину меньше единицы. Эквивалентная схема на рис. 6-39, *б* позволяет представить интегральную транзисторную структуру в виде идеального дискретного транзистора (внутри пунктирного квадрата), с которым соединены последовательное сопротивление коллектора, емкость подложки и «паразитный» *p-n-p* транзистор.

Другой фактор, влияющий на характеристики интегрального транзистора, связан с тем, что процент выхода годных монолитных приборов должен быть гораздо больше по сравнению с дискретными приборами. Для дискретных транзисторов может быть экономически выгодным изготовление 50% годных приборов, а в интегральной схеме должны функционировать все транзисторы, чтобы схема была работоспособной. Поэтому эффективность конструирования интегральных приборов зависит не только от разрешающей способности и точности применяемого способа изготовления, но и от его воспроизводимости. В табл. 6-1 приведены типовые параметры дискретного и интегрального транзисторов, имеющих приблизительно одинаковую геометрическую форму.

Недостатки интегральных транзисторов могут быть уменьшены путем совершенствования технологии производства. Естественно, совершенствование технологии приведет к улучшению качества и дискретных приборов, но разница между параметрами интегральных и дискретных транзисторов при этом будет стираться. Только один параметр остается неизменным — это площадь кремниевой подложки, занимаемая дискретным и интегральным приборами. Если интегральный прибор занимает площадь около 0,03 мм^2, то для дискретного транзистора необходимо по крайней мере 0,12 мм^2. Последнее связано с тем, что работать с отдельной пластинкой, имеющей размер менее 0,1 мм^2, практически невозможно (активная часть пластинки при этом может быть существенно меньше). В интегральной схеме транзистор более эффективно использует площадь кремниевой подложки, отводимую под этот элемент, т. е. площадь транзистора лишь незначительно больше его активной части. Поэтому недостатки интегральных приборов могут быть в какой-то мере скомпенсированы применением транзисторов больших размеров, изготовлением

Таблица 6-1

Параметр	Дискретный	Интегральный
Усиление по току	30—200	30—200
Напряжение пробоя эмиттера, В	5—8	5—8
Напряжение пробоя коллектора, В	20—200	20—90
Предельная частота, МГц . .	2000	1500
Емкость коллектора, пФ . . .	0,5	0,8
Емкость изоляции, пФ . . .	—	1,5
Напряжение пробоя изоляции, В	—	90
Сопротивление насыщения, Ом	5	10

приборов специальной формы или нескольких транзисторов, выполняющих те же функции, что и один дискретный прибор. Мерой эффективности интегральной схемы являются характеристики не отдельных элементов, а всей схемы в целом.

ВОПРОСЫ

1. Верхний вывод коллектора приводит к увеличению сопротивления . . . . интегрального транзистора.

2. Высокочастотные параметры интегрального транзистора ограничиваются . . . . перехода коллектор-подложка.

3. Разработчик интегрального транзистора должен учитывать не только дополнительную емкость, но и присутствие паразитного . . . .

ОТВЕТЫ

1. Верхний вывод коллектора приводит к увеличению сопротивления **насыщения** интегрального транзистора.
2. Высокочастотные параметры интегрального транзистора ограничиваются **емкостью** перехода коллектор-подложка.
3. Разработчик интегрального транзистора должен учитывать не только дополнительную емкость, но и присутствие паразитного *p-n-p* **транзистора.**

Полевой транзистор со структурой МОП. На рис. 6-40 показан полевой транзистор со структурой металл-окисел-полупроводник или МОП-транзистор. Транзистор формируется путем диффузии двух *p*-областей стока и истока в *n*-область. Затем пластина покрывается окислом, в котором изготовляются окна для контактов к *p*-областям. Металлизация используется не только для обеспечения контактов с *p*-областями, но также и для образования третьего электрода, перекрывающего окисел между областями стока и истока. Этот электрод

называется затвором. При нулевом напряжении на затворе между стоком и истоком ток протекать не может, так как эти области эквивалентны двум диодам, включенным навстречу друг другу. Если же к затвору прикладывается достаточно большое отрицательное напряжение, то область под электродом затвора может изменить знак проводимости за счет притягивания дырок к поверхности, обеспечивая тем самым прохождение тока. Изменение напряжения на затворе будет изменять эффективное сопротивление канала между стоком и истоком, что позволяет получить усиление. Прибор является весьма интересным с точки зрения его очень большого входного сопротивления.

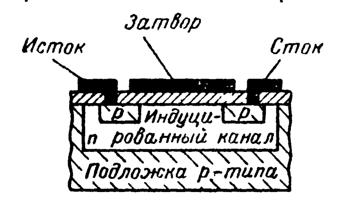


Рис. 6-40. Структура полевого МОП-транзистора.

Конденсаторы. Конденсатор со структурой металл-окисел-полупроводник (МОП-емкость) показан на рис. 6-41. Из эквивалентной схемы следует, что основное ограничение на параметры интегрального конденсатора связано с наличием относительно большой шунтирующей емкости на подложку. В качестве диэлектрического материала, естественно, используется двуокись кремния. Толщина

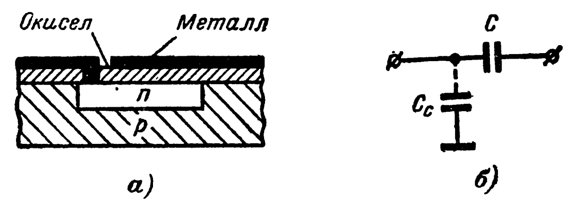


Рис. 6-41. Интегральный монолитный конденсатор.
а — структура; *б* — эквивалентная схема.

этого окисла должна быть такой, которая может быть получена технологическим методом, используемым для изготовления других элементов интегральной схемы. Конденсаторами могут также служить *p-n* переходы. Недостатком таких конденсаторов является зависимость от напряжения и необходимость поддержания отрицательного смещения на переходе.

ВОПРОСЫ

1. **Полевые МОП-транзисторы весьма интересны, так как имеют большое . . . .**
2. **Конденсаторы в интегральных схемах могут получаться за счет использования МОП-структур или смещенных в обратном направлении . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Полевые МОП-транзисторы весьма интересны, так как имеют большое **входное сопротивление.**

2. Конденсаторы в интегральных схемах могут получаться за счет использования МОП-структур или смещенных в обратном направлении *p-n*-переходов.

Интегральные резисторы. Структура интегрального резистора показана на рис. 6-42. Как следует из эквивалентной схемы, работа резистора на высоких частотах будет зависеть от шунтирующего действия емкостей между резистором, областью *n*-типа и *p*-подложкой. Кроме того, резистор является эмиттером *p-n-p* паразитного транзистора. Действие последнего предотвращается смещением *n*-области большим положительным потенциалом по сравнению с *p*-областями. Паразитные емкости становятся особенно важными тогда,

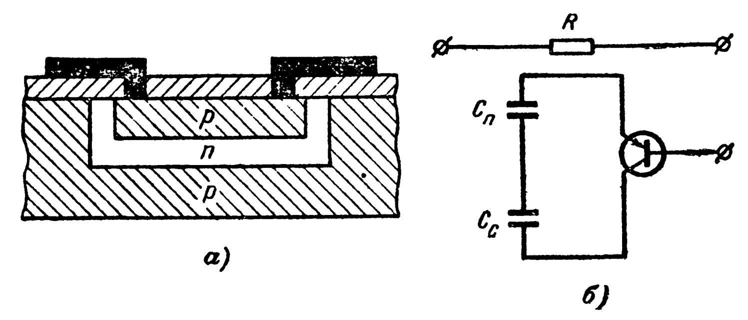


Рис. 6-42. Интегральный монолитный резистор.

а — структура; *б* — эквивалентная схема.

когда сопротивление резистора превышает несколько тысяч ом. На высоких частотах влияние паразитных емкостей в транзисторе более существенно по сравнению с рассматриваемым случаем. Одна из важных проблем при проектировании интегрального резистора заключается в получении требуемого сопротивления и заданного разброса. Сопротивление резистора определяется по формуле

$$R=\rho\frac{l}{S},$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление; l — длина; S — площадь поперечного сечения.

Если глубину диффузионной области резистора обозначить через t, ширину резистора через w, а величину ρ рассматривать как среднее удельное сопротивление диффузионной области, то можно получить:

$$R=\rho\frac{l}{tw}=\frac{\rho}{t}\frac{l}{w}=R_s\frac{l}{w}.$$

Таким образом сопротивление резистора зависит от двух факторов. Первый фактор — сопротивление слоя диффузионной пленки. Оно полностью определяется параметрами процесса диффузии при изготовлении базовой области *n-p-n* транзистора. Второй фактор зависит от возможностей техники фотолитографии, определяющей форму и размеры элементов. Как и в случае тонкопленочных резисторов со-

противление диффузионных резисторов не зависит от их площади, а определяется отношением длины к ширине. Минимальная ширина резистора определяется разрешающей способностью технологического процесса и требуемой точностью. Обычно ширину резисторов выбирают около 10 мкм. Для резисторов с очень малыми допусками на сопротивление ширина может составлять около сотни микрометров.

Сопротивление слоя выбирается в диапазоне от 150 до 200 Ом/кв. Слишком большое сопротивление слоя приводит к нестабильности сопротивления резисторов при изменении температуры, слишком низкое затрудняет изготовление транзисторов, так как их база в этом случае получается низкоомной. Сопротивление полупроводниковых резисторов увеличивается приблизительно на четверть процента на каждый градус Цельсия. Это затрудняет точный контроль сопротивления резисторов в широком диапазоне температур. Конструкторы микросхем обходят эту проблему, проектируя схемы таким образом, чтобы главное значение имело отношение сопротивлений резисторов, так как отношение определяется только геометрическими размерами и может точно контролироваться.

ВОПРОСЫ

1. **Сопротивление диффузионных резисторов зависит от .... слоя базовой диффузии и .... резисторов.**
2. **Так как сопротивление диффузионных резисторов сильно зависит от температуры, то интегральные схемы проектируются таким образом, чтобы главное значение имело .... сопротивлений резисторов, а не их абсолютные величины.**

ОТВЕТЫ

1. Сопротивление диффузионных резисторов зависит от **сопротивления** слоя базовой диффузии и **формы** резисторов.
2. Так как сопротивление диффузионных резисторов сильно зависит от температуры, то интегральные схемы проектируются таким образом, чтобы главное значение имело **отношение** сопротивлений резисторов, а не их абсолютные величины.

Фактор стоимости. Стоимость изготовления полупроводниковой интегральной схемы на пластине не зависит от конфигурации схемы и ее сложности, так как пассивные элементы получаются одновременно с транзисторами и диодами. Но в то же время стоимость каждой схемы сильно зависит от площади, занимаемой схемой. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, очевидно, что если площадь схемы мала, то на данной полупроводниковой пластине может быть размещено большее число схем. Вторая, не столь очевидная причина, иллюстрируется на рис. 6-43. По мере увеличения площади отдельной схемы не только уменьшается число схем на пластине, но и сокращается процент годных схем из всех изготовленных на подложке. Последнее становится ясным из рис. 6-43, *б*. Предположим, что на пластине имеется определенное число дефектов из-за несовершенства используемых материалов, масок, ошибок технологии и

т. п., причем каждый такой дефект приводит к порче всей схемы. На рисунке показано четыре таких точечных дефекта. Если площадь схемы такова, что на всей подложке располагаются только четыре схемы, то процент выхода годных схем будет равен нулю. Если же площадь каждой схемы уменьшить в четыре раза и разместить их на той же подложке, то четыре дефекта снова выведут из строя четыре схемы, но в этом случае пластина будет содержать 12 дополни-

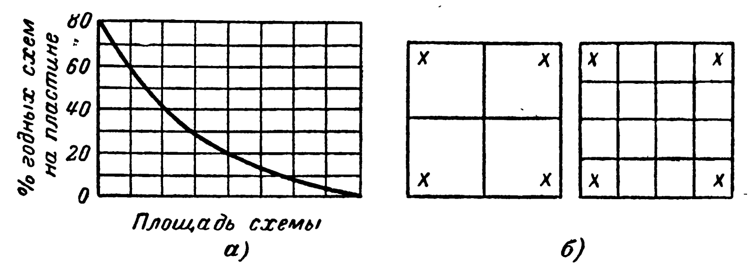


Рис. 6-43. Влияние площади схемы на процент выхода (*а*); точечные дефекты (*б*).

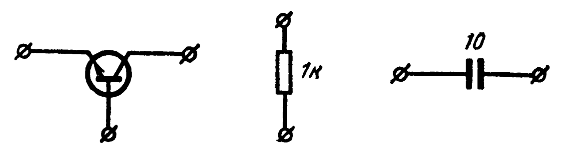


Рис. 6-44. Элементы одинаковой площади и стоимости.

тельных годных схем, что обеспечит получение выхода годных приборов 75%. Существуют определенные ограничения изложенной точки зрения, но несомненно одно, что площадь интегральной схемы является одним из важнейших факторов, влияющих на ее стоимость. Поэтому стоимость отдельного элемента внутри схемы зависит не от выполняемых им функций, а от занимаемой площади. На рис. 6-44 показаны три интегральных элемента, занимающих одинаковую площадь и, следовательно, имеющих одинаковую стоимость. Экономически эквивалентно изготовить конденсатор емкостью 10 пФ, резистор сопротивлением 1000 Ом или транзистор. Самым дорогим элементом является конденсатор.

Резистор имеет среднюю стоимость, а транзистор — самую низкую. Ситуация отличается от той, которая имеет место в обычных схемах, где транзистор является самым дорогим элементом. Поэтому наиболее экономичным путем «интегрализации» схемных функций является не копирование известных схем на дискретных элементах, а видоизменение их таким образом, чтобы схемы содержали большее количество транзисторов и меньшее число пассивных элементов.

ВОПРОСЫ

1. **Стоимость изготовления интегральных схем на полупроводниковой подложке не зависит от степени сложности . . . .**

2. **Наиболее важным фактором, определяющим стоимость интегральной схемы на пластинке, является . . . . , занимаемая схемой.**
3. **Самым дорогим элементом интегральных схем является . . . .**
4. **Наиболее дешевым элементом интегральных схем является . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Стоимость изготовления интегральных схем на полупроводниковой подложке не зависит от степени сложности **схем.**
2. Наиболее важным фактором, определяющим стоимость интегральной схемы на пластинке, является **площадь**, занимаемая схемой.
3. Самым дорогим элементом интегральных схем является **конденсатор.**
4. Наиболее дешевым элементом интегральных схем является **транзистор.**

Фотошаблоны. Размеры и соединения между отдельными элементами в интегральной схеме определяются специальными фотомасками

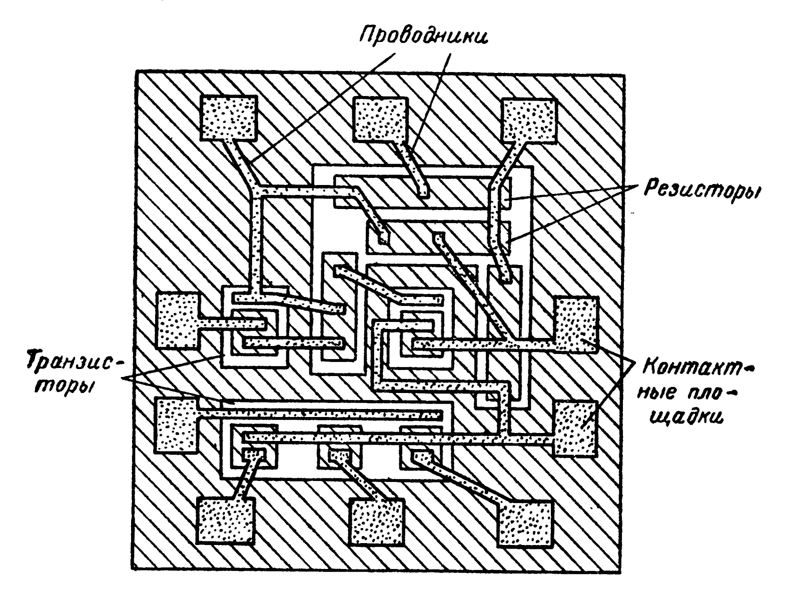


Рис. 6-45. Топология интегральной схемы.

или фотошаблонами при фотолитографическом процессе. Эти маски представляют собой своего рода специальный инструмент для изготовления кремниевых интегральных схем. Минимальное число различных масок, необходимое для создания одной простейшей схемы,

равно пяти. Функция каждой из этих пяти масок иллюстрируется с помощью топологии интегральной схемы, приведенной на рис. 6-45. Схема представляет собой простейший логический элемент.

Первая маска предназначена для создания изолированных n-областей на поверхности пластины. Для рассматриваемой схемы требуется четыре различные n-области. Три транзистора в нижней части рисунка имеют общий коллектор и поэтому могут располагаться в одной области. Размещение всех резисторов в одной изолированной области упрощает создание верхней части схемы. Следующая маска используется для размещения в нужных местах резисторов и базовых областей транзисторов. Третья маска необходима для вскрытия окон в p-областях транзисторов перед эмиттерной диффузией и в областях n-типа для создания высоколегированных участков во время проведения диффузии. Последнее обеспечивает контакты с относительно низколегированными n-областями. Четвертая маска предназначена для вскрытия контактных окон в транзисторах и резисторах с целью получения соответствующих соединений через эти окна. Как правило, эта маска должна иметь наиболее высокую точность, вследствие того что контактное окно к эмиттеру располагается внутри наиболее узкой эмиттерной области. Последняя маска обычно относительно сложная. Она определяет рисунок соединений элементов схемы и обеспечивает изготовление контактных площадок для связи с другими внешними элементами.

Для изготовления различных интегральных схем требуется от шести до девяти масок. Маски должны иметь допуски порядка десятых долей микрометра, чтобы обеспечить, например, возможность создания структуры высокочастотного транзистора. Так как на одной кремниевой пластине изготовляются сотни одинаковых схем, то каждая маска должна состоять из сотен одинаковых частей, размещенных в виде сетки по всей поверхности маски, причем расположение любого рисунка или линии должно контролироваться с точностью до долей микрометра.

ВОПРОСЫ

1. **Фотошаблон представляет собой своеобразный .... для изготовления интегральных схем.**
2. **Минимальное количество масок для изготовления интегральной схемы равно ....**
3. **Наибольшая точность предъявляется к маскам для получения .... окон.**

ОТВЕТЫ

1. Фотошаблон представляет собой своеобразный **инструмент** для изготовления интегральных схем.
2. Минимальное количество масок для изготовления интегральной схемы равно **пяти.**
3. Наибольшая точность предъявляется к маскам для получения **контактных** окон.

Изготовление фотошаблона начинается с получения увеличенного изображения нужного топологического рисунка. Увеличение обычно составляет 200—500 раз по отношению к реальному размеру схемы. Рисунок вырезается на непрозрачном материале, в качестве

которого чаще всего используется обычный прозрачный пластик, покрытый желатином. Окна, соответствующие заданной топологии, получаются при удалении желатина. Точность используемого при этом оборудования составляет тысячные доли сантиметра, что позволяет получать на окончательном рисунке при 200-кратном увеличении точность до нескольких долей микрометра. При этом полагается, что в процессе фотографического уменьшения не вносится существенных искажений.

Уменьшение топологического рисунка и получение фотошаблона на основе увеличенного изображения иллюстрируется на рис. 6-46

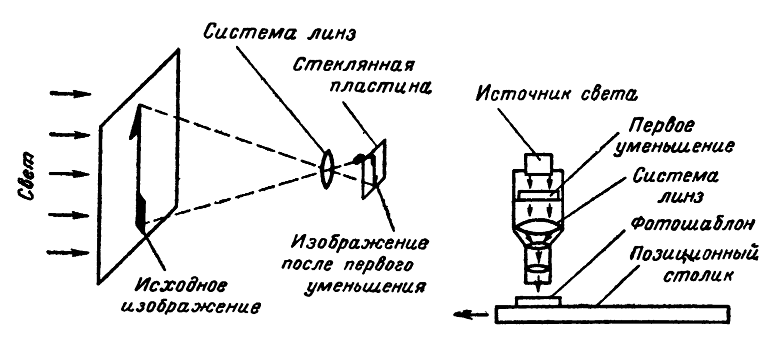


Рис. 6-46. Первоначальное уменьшение изображения.

Рис. 6-47. Получение фотошаблона.

и 6-47. Фотографическое уменьшение выполняется в два этапа. Сначала рисунок уменьшается в 20 раз, в результате чего получается единичное изображение на стекле (рис. 6-46). Эта операция проводится очень тщательно. Любой наклон рисунка или системы линз приводит к искажению получаемого изображения. Окончательное уменьшение выполняется на приборе, называемом фотоштампом. Пластина, полученная после первого уменьшения, размещается между источником света и специальной системой линз. Фоточувствительная пластинка, предназначенная для создания фотошаблона, размещается по другую сторону линз на позиционном столике, положение которого может очень точно контролироваться. Источник света включается для экспонирования одного рисунка, после чего столик смещается в положение для получения нового изображения. Подобные пошаговые фотографические операции осуществляются последовательно в горизонтальном и вертикальном направлениях до тех пор, пока не будет получено необходимое количество экспонированных рисунков. После проявления пластина может непосредственно использоваться в качестве маски при фотолитографии, но чаще всего она является основой для изготовления металлизированных фотошаблонов способом контактной печати. Последние более прочны и имеют длительный срок службы.

В настоящее время широко используются многопозиционные фотоштампы. Они состоят из нескольких взаимосвязанных систем линз, расположенных над одним позиционным столиком. Весь набор масок в этом случае получается одновременно за счет того, что каждый

рисунок размещается над отдельной линзой, а экспонирование происходит в одно и то же время. Преимущества этого способа заключаются в том, что любая ошибка, возникающая при перемещении столика, приводит к сдвигам изображения на отдельных масках в одном направлении и поэтому относительное расположение линий не изменяется. Изготовление фотошаблонов предъявляет высокие требования к оптическим, фотографическим и механическим операциям. Совершенствование этих операций позволяет изготовлять полупроводниковые приборы с очень малыми геометрическими размерами в больших и сложных интегральных схемах.

ВОПРОСЫ

1. **Изготовление фотошаблона начинается с изготовления рисунка схемы, ... в несколько сотен раз.**
2. **Заключительиая операция при изготовлении фотошаблона состоит в . . . . экспонировании одиой пластины несколько сотен раз.**

ОТВЕТЫ

1. Изготовление фотошаблона начинается с изготовления рисунка схемы, **увеличенного** в несколько сотен раз.
2. Заключительная операция при изготовлении фотошаблона состоит в **пошаговом** экспонировании одной пластины несколько сотен раз.

6-5. КОРПУСА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Полупроводниковая технология позволяет значительно уменьшить физические размеры элементов, необходимых для выполнения электронных функций. Однако этот процесс существенно затрудняет соединение микроэлементов между собой и приводит к возрастанию стоимости сборки. Для соединения с другими элементами на подложку с интегральными схемами напыляются контактные площадки,

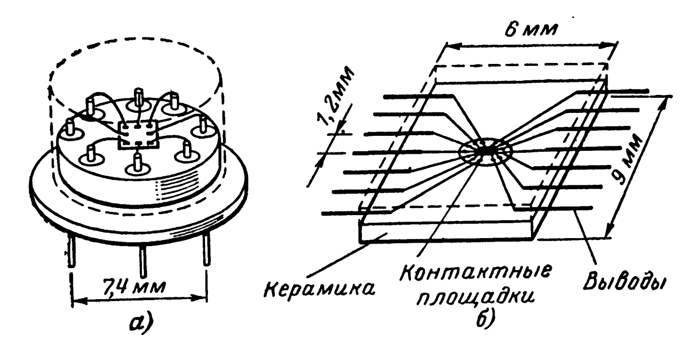


Рис. 6-48. Корпуса интегральных схем.
а — круглый корпус; *б* — плоский корпус.

к которым возможно присоединение внешних выводов с помощью термокомпрессионной или ультразвуковой сварки. Для соединения интегральных схем в системы чаще всего используют пайку или сварку. По этой причине интегральные схемы размещаются в корпуса, которые могут соединяться между собой с помощью этих способов.

На рис. 6-48, *а* приведен внешний вид круглого корпуса, предназначенного для сварного соединения. Его гибкие выводы могут присоединяться к различным частям печатной платы, что имеет несомненные достоинства. Недостатком этого корпуса является ограниченное число выводов, максимальное количество которых равно 12. Плоский корпус (рис. 6-48, *б*) спроектирован с целью уменьшения

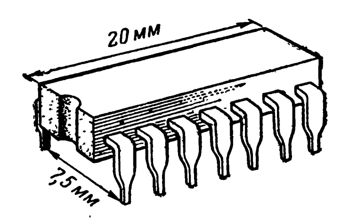


Рис. 6-49. Корпус с двумя рядами выводов.

объема и возможности присоединения интегральной схемы к поверхности печатной платы. Кроме того, плоский корпус может иметь большее количество выводов. Малое расстояние между его выводами (около 1,2 мм) затрудняет использование обычных способов получения паяных соединений. Корпус с двумя рядами выводов (рис. 6-49) занимает больший объем, чем плоский корпус, но расстояние между его выводами составляет около 2,5 мм и поэтому соединение с печатной платой может быть выполнено без особых затруднений. Корпуса интегральных схем изготовляются из всевозможных материалов, например стекла, металла, керамики и различных видов пластика.

ВОПРОСЫ

1. **Для изготовления полупроводниковых приборов в основном используются элементы третьей, четвертой и пятой групп периодической системы. Наиболее важным элементом в полупроводниковых интегральных схемах является кремний.**
   а) **Кремниевая планарная технология используется для изготовления интегральных схем, так как . . . . свойства окиси кремния упрощают процесс . . . . элементов между собой.**
   б) **Геометрические размеры приборов в планарном процессе определяются операциями . . . ., ... и фотолитографии.**
   в) **Для создания кремниевых интегральных схем необходимо изготовить . . . ., элементы и . . . . их между собой.**
2. **Технология изготовления дискретных кремниевых планарных транзисторов может быть распространена на создание транзисторов, резисторов и конденсаторов, соединенных в интегральную схему.**
   а) **Диффузионные резисторы могут занимать небольшую площадь, но их сопротивление изменяется с . . . .**

б) **Интегральные транзисторы имеют большее сопротивление . . . . и большее число паразитных элементов по сравнению с . . . . транзисторами.**

ОТВЕТЫ

1.*а*) Кремниевая планарная технология используется для изготовления интегральных схем, так как **изолирующие** свойства окиси кремния упрощают процесс **соединений** элементов между собой.

б) Геометрические размеры приборов в планарном процессе определяются операциями **окисления**, **диффузии** и фотолитографии.

в) Для создания кремниевых интегральных схем необходимо изготовить **изоляцию**, элементы и **соединить** их между собой.

2.*а*) Диффузионные резисторы могут занимать небольшую площадь, но их сопротивление изменяется с **температурой.**

б) Интегральные транзисторы имеют большее сопротивление **насыщения** и большее число паразитных элементов по сравнению с **дискретными** транзисторами.

Глава седьмая

БОЛЬШИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

С чем Вы познакомитесь в этой главе. Развитие технологии тонких пленок и полупроводников для изготовления микроминиатюрных элементов и схем стимулировало исследования в области производства и герметизации больших электронных комплексов. Данная глава посвящена вопросам технологии, проблемам и потенциальным возможностям крупномасштабной «интегрализации». Проведен обзор областей применения, в которых целесообразно использование больших интегральных схем. Проанализированы проблемы надежности таких схем и вопросы их герметизации в корпусе. Технологические проблемы изготовления больших интегральных схем рассмотрены в сравнении с производством обычных монолитных схем. Обсуждены такие вопросы, как процент выхода, выполнение пересечений, рассеяние мощности и проблема испытаний. В заключение рассмотрены основные технологические способы, используемые для получения больших интегральных схем, описаны преимущества и недостатки этих способов.

7-1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ БОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Большие интегральные схемы (БИС) позволяют выполнять сложные электронные функции в одном корпусе. В цифровых системах они могут быть использованы для изготовления таких устройств, как регистры, счетчики, узлы памяти и т. п. В линейных малосигнальных схемах БИС могут выполнять функции приемника или передатчика

в одном корпусе. Если обычные интегральные схемы представляют собой соединение нескольких отдельных элементов, то получение БИС основано на объединении в один корпус нескольких функциональных каскадов, причем каждый такой каскад теряет свою конструктивную индивидуальность. Внешние соединения необходимы лишь для выполнения заданной электронной функции. Параметры большой интегральной схемы оцениваются в целом, а не по характеристикам ее отдельных частей.

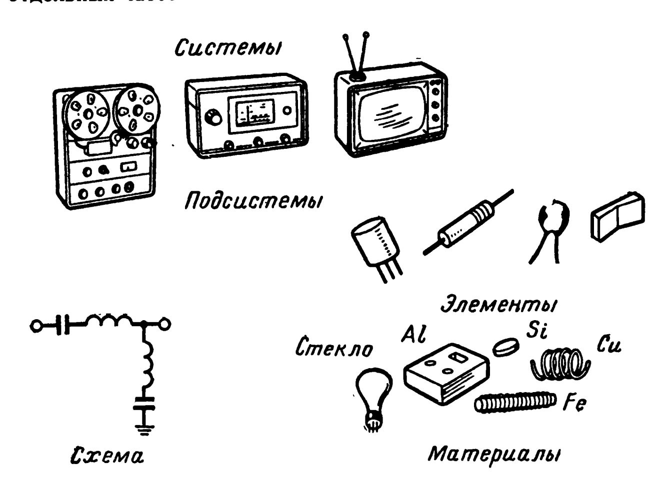


Рис. 7-1. Изготовление электронной системы.

Создание любой системы основывается на решении большого круга производственных вопросов в областях изучения свойств материалов, проектирования и изготовления элементов, выполнения соединений и проектирования схем, создания подсистем на основе соединения отдельных схем и, наконец, проектирования и получения систем (рис. 7-1). Технология изготовления интегральных схем включает три первые сферы. Применение БИС требует расширения технологии изготовления элементов до уровня подсистем. Это приводит не только к усложнению и совершенствованию технологии изготовления, но и к существенному повышению уровня контроля технологических процессов и испытаний схем.

7-2. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БИС

Успехи последних лет в технологии изготовления разнообразных электронных элементов позволили снизить их стоимость и повысить надежность. Поэтому в большинстве случаев стоимость, надежность и параметры электронных систем ограничиваются эффективностью и надежностью используемого способа выполнения соединений, а не самими элементами. Это особенно ярко проявляется на примере электронных цифровых вычислительных машин. Основным элементом

цифровой вычислительной машины является логический элемент, который используется для управления сигналами в машине и служит в качестве элементарного «строительного кирпичика» для построения более сложных функциональных систем. Как правило, логический элемент имеет два или более входов, уровни напряжения на которых определяют логический уровень выходного сигнала. В цифровых системах используются главным образом два уровня сигналов, которые могут быть разделены на «высокий» и «низкий» или 1 и 0. Логический элемент И имеет высокий уровень на выходе, если все его входы соответствуют высокому уровню. Если высокий выходной уровень появляется при наличии высокого уровня хотя бы на одном входе, то логический элемент выполняет функцию ИЛИ. Элемент НЕ — ИЛИ имеет низкий уровень на выходе при высоком уровне на любом входе. На рис. 7-2 показаны условное изображение и принципиальная схема двухвходового элемента НЕ — ИЛИ.

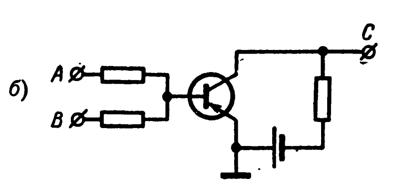


Рис. 7-2. Цифровой логический элемент НЕ — ИЛИ.

а — условное изображение; *б* — принципиальная схема.

ВОПРОСЫ

1. **Большие интегральные схемы получаются при объединении нескольких функциональных каскадов в . . . .**
2. **Отличие БИС от обычных интегральных схем заключается в том, что составные элементы БИС теряют свою конструктивную индивидуальность как отдельные . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Большие интегральные схемы получаются при объединении нескольких функциональных каскадов в **одном корпусе.**
2. Отличие БИС от обычных интегральных схем заключается в том, что составные элементы БИС теряют свою конструктивную индивидуальность как отдельные **каскады.**

На рис. 7-4 показано получение функции «полного сумматора» путем соединения девяти двухвходовых элементов НЕ — ИЛИ. Эта функция поясняется простой операцией сложения (рис. 7-3). Сложение чисел *A* и *B* осуществляется передачей цифр из одной колонки в другую. Цифра 4 из строки числа *A* добавляется к цифре 9 в строке числа *B*, результат сложения — цифра 3 остается в колонке ответа, а единица передается в следующую колонку. Сложение в любой

следующей колонке учитывает не только соответствующие цифры чисел *A* и *B*, но и результат переноса из соседней колонки. Можно считать, что каждый логический элемент имеет пять выводов: два

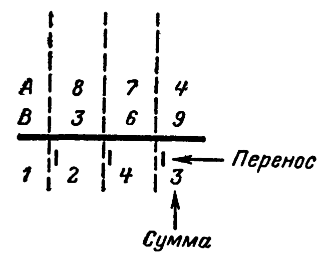


Рис. 7-3. Пример сложения.

входа, один выход и два вывода для подачи питающего напряжения.

Так как сумматор состоит из 9 одинаковых элементов, то всего необходимо создание 45 паяных соединений. Если же сумматор выполняется в одном корпусе, то требуется только семь выводов: два для

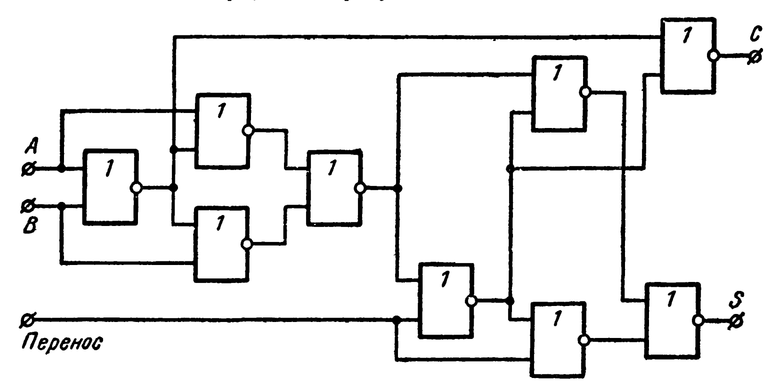


Рис. 7-4. Сумматор на схемах НЕ — ИЛИ.

питания, три входных вывода и два для суммы и переноса. Поэтому число необходимых соединений на печатной плате в случае выполнения схемы в одном корпусе уменьшается более чем в шесть раз. Так как число соединений на плате существенно влияет на стоимость системы и ее надежность, то использование сложных схем является весьма перспективным.

ВОПРОСЫ

1. **БИС представляет собой распространение технологии отдельных элементов до уровня . . . .**
2. **Основным элементом цифровой вычислительной машины является цифровой . . . .**

3. **Использование больших интегральных схем вместо нескольких простейших элементов уменьшает стоимость и повышает надежность системы, так как при этом уменьшается число .... на ....**

ОТВЕТЫ

1. БИС представляет собой распространение технологии отдельных элементов до уровня **подсистем.**
2. Основным элементом цифровой вычислительной машины является цифровой **логический элемент.**
3. Использование больших интегральных схем вместо нескольких простейших элементов уменьшает стоимость и повышает надежность системы, так как при этом уменьшается число **соединений** на **печатной плате.**

Улучшение электрических характеристик. Герметизация нескольких каскадов в одном небольшом корпусе приводит не только к уменьшению размеров системы, но и к улучшению характеристик соответствующего устройства. Плотная упаковка способствует уменьшению индуктивности выводов и паразитных емкостей, которые ограничивают быстродействие цифровых схем. Объединение многих схем в одном корпусе позволяет поддерживать температуру всех элементов одинаковой, что облегчает проектирование стабильных систем. Кроме того, в БИС облегчается подача напряжения питания к каждому отдельному элементу, так как они соединены в одном корпусе. Это уменьшает влияние шумов и помех на работу системы.

Фактор стоимости. Несмотря на тот очевидный факт, что изготовление больших интегральных схем является более сложным процессом по сравнению с изготовлением простых интегральных схем,

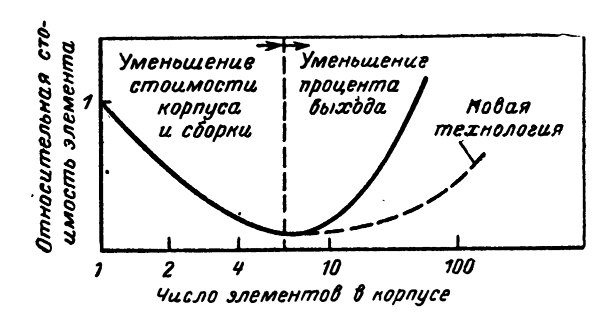


Рис. 7-5. Зависимость стоимости схемы от ее сложности.

использование БИС не обязательно приводит к увеличению стоимости системы. Цифровая система, использующая БИС, может быть более экономичной, так как при увеличении стоимости всей совокупности каскадов стоимость, приходящаяся на один элемент, может быть равной или даже меньше стоимости элемента в отдельном каскаде обычной интегральной схемы. На рис. 7-5 показано изменение относи-

тельной стоимости одного логического элемента при увеличении сложности схемы. Полагается, что схема является полупроводниковой или тонкопленочной интегральной, которая может быть размещена в корпусе с многими выводами. Стоимость сборки и стоимость корпуса представляют собой основные части в общей стоимости интегральной схемы. Так как затраты на сборку и корпус в основном не зависят от сложности самой схемы, то естественно ожидать, что по мере увеличения сложности, т. е увеличения числа логических элементов в схеме, стоимость одного элемента будет уменьшаться. Однако с возрастанием сложности будет снижаться процент выхода годных элементов. Увеличение связанных с этим потерь компенсирует выигрыш в стоимости корпуса и сборки, поэтому стоимость элемента возрастает. Пунктирная кривая на рисунке отражает совершенствование технологии изготовления больших интегральных схем, что приводит к снижению относительной стоимости логического элемента при том же количестве элементов в корпусе. Процент выхода одного каскада в БИС будет выше, чем для отдельно изготовленного каскада. Причина заключается в том, что отдельный каскад должен удовлетворять широкому кругу требований в самых неблагоприятных условиях работы, в то время как, будучи составной частью большой интегральной схемы, каскаду достаточно удовлетворять лишь специфическому набору условий, соответствующих заданному уровню рассеиваемой мощности и нагрузочным характеристикам. Такие показатели, как процент выхода и затраты на проверку функционирования для одной схемы из 10 элементов, существенно лучше, чем при сборке и проверке 10 отдельных элементов.

Приведенные рассуждения относятся к окончательной стоимости изготовленных приборов после вложения соответствующих затрат в новое производство. Общие технические и инженерные затраты на создание БИС много больше, чем в случае изготовления простейших схем. Выигрыш получается после окончательной сборки системы и проверки ее работоспособности.

ВОПРОСЫ

1. **Плотная упаковка больших интегральных схем позволяет повысить . . . . цифровых схем.**
2. **По мере увеличения сложности схемы стоимость одного логического элемента уменьшается, так как снижаются затраты на . . . .**
3. **Требования к параметрам логического элемента в БИС менее жесткие по сравнению с требованиями к отдельной схеме, так как изолированный элемент проектируется в расчете на самые . . . . работы.**

ОТВЕТЫ

1. Плотная упаковка больших интегральных схем позволяет повысить **быстродействие** цифровых схем.
2. По мере увеличения сложности схемы стоимость одного логического элемента уменьшается, так как снижаются затраты на **корпус.**
3. Требования к параметрам логического элемента в БИС менее жесткие по сравнению с требованиями к отдельной схеме, так как изолированный элемент проектируется в расчете на самые **неблагоприятные условия** работы.

Проблемы больших интегральных схем. Переход от простых интегральных схем к БИС аналогичен переходу от дискретных элементов к интегральным схемам. Простое копирование схемы при переводе ее в интегральную форму, т. е. осуществление простой замены дискретных элементов на интегральные аналоги, нецелесообразно ни с технической, ни с экономической точек зрения. Более выгодно детально рассмотреть требуемую функцию и выбрать для ее реализации такой путь, который бы использовал все преимущества и по возможности обходил недостатки имеющихся в распоряжении технологических способов. Аналогично проектирование БИС для выполнения определенной подсистемной функции требует гораздо большего вни-

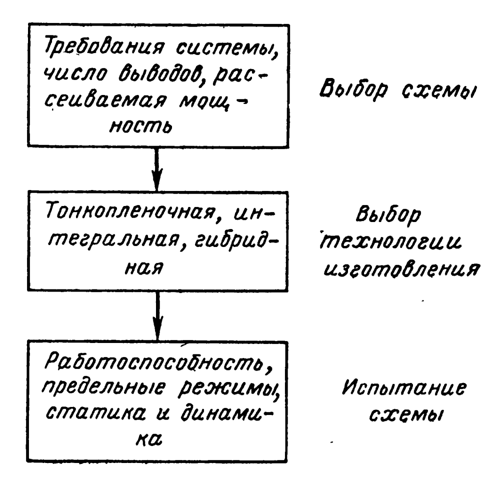


Рис. 7-6. Проектирование БИС.

мания инженеров, чем простое копирование комбинации нескольких интегральных схем, расположенных, например, на плате вычислительной машины. Такая плата может содержать от 20 до 100 элементов, причем конструирование платы идет по пути уменьшения числа необходимых элементов, а не числа плат с различными схемами. Напротив, наиболее эффективный способ конструирования БИС состоит в минимизации внешних соединений схемы, используя более сложный рисунок соединений внутри корпуса.

На рис. 7-6 показаны основные этапы, которые должны быть рассмотрены, прежде чем решить вопрос о выборе пути построения БИС. Прежде всего необходимо рассмотреть функциональные узлы электронной системы с тем, чтобы найти способ расчленения всей системы и ее частей на минимальное число стандартных БИС. Если какая-либо часть системы требует использования небольшого количества БИС одного и того же типа, то высокая стоимость разработки и создания БИС может служить препятствием для ее изготовления. Выбранные схемы должны обеспечивать выполнение заданных электронных функций в стандартных корпусах с 14, 28 или 40 выводами.

Величина допустимой мощности, рассеиваемой корпусом, должна соответствовать максимальной мощности рассеяния БИС.

Особое внимание следует уделять выбору технологии изготовления интегральной схемы, принимая в расчет достоинства и ограничения различных видов технологии. Если характеристики схемы таковы, что ни тонкопленочная, ни интегральная технология не могут обеспечить получение приемлемого процента выхода, то следует выбрать гибридный вариант. Выбор необходимых тестов и составление программы тестовых испытаний представляют собой самостоятельные достаточно сложные задачи. Увеличение количества электрических и функциональных связей внутри корпуса большой интегральной схемы по сравнению с обычной схемой приводит к экспоненциальному росту числа необходимых тестов для получения гарантированных характеристик во всем диапазоне изменения входных сигналов. Проверка схемы на плате лишь частично восполняет потребность в тестовых испытаниях, так как непосредственный доступ к отдельным точкам внутри схемы практически неосуществим. Поэтому для удовлетворительной проверки БИС требуется использование небольшой вычислительной машины со специальной программой.

ВОПРОСЫ

1. **Переход от обычных интегральных схем к большим интегральным схемам аналогичен переходу от .... элементов к интегральным схемам.**
2. **Оптимальное проектирование систем состоит в предельном уменьшении числа .... БИС.**

ОТВЕТЫ

1. Переход от обычных интегральных схем к большим интегральным схемам аналогичен переходу от **дискретных** элементов к интегральным схемам.
2. Оптимальное проектирование систем состоит в предельном уменьшении числа **различных** БИС.

7-3. ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ

Основные проблемы изготовления больших интегральных схем сводятся к получению достаточно высокого процента выхода годных схем при условии сохранения стоимости БИС на экономически приемлемом уровне. Так как функции отдельного каскада БИС узко специализированы, а входные и выходные характеристики точно определены, то каскад может проектироваться таким образом, чтобы выполнение заданной функции достигалось при относительно больших допусках на номиналы элементов. Поэтому процент выхода на каскад внутри большой интегральной схемы может быть выше по сравнению с отдельным каскадом, который рассчитывается на самые неблагоприятные условия работы. Отдельные схемы в БИС функционируют нормально в том случае, если они не содержат серьезных дефектов — обрывов или коротких замыканий. Если считать, что основные потери в выходе годных схем связаны со случайным появлением таких дефектов, то процент выхода БИС, состоящей из n от-

дельных каскадов, будет равен проценту выхода отдельного каскада в степени n (возведение в степень объясняется тем, что вероятность отказа каждого каскада является независимым событием). Например, если отдельный каскад может быть изготовлен с процентом выхода, равным 70%, то для БИС из десяти таких каскадов процент выхода будет равен 0,7 в степени 10, т. е будет составлять примерно 3%. На рис. 7-7 показана зависимость процента выхода от числа каскадов в БИС при различных значениях процента выхода на один каскад. Если предположить, что с экономической точки зрения невыгодно изготовлять БИС с выходом менее одного процента, то из рисунка следует, что даже для схем средней сложности

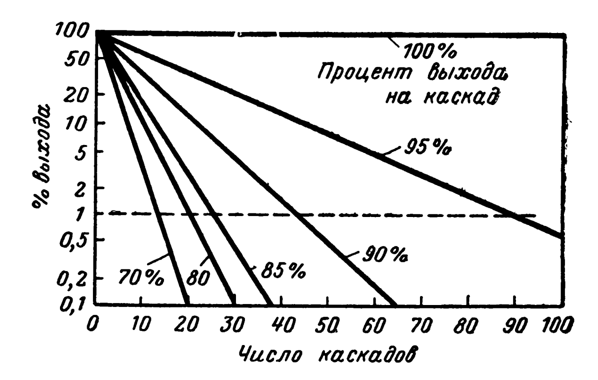


Рис. 7-7. Зависимость процента выхода от числа каскадов.

процент выхода отдельного каскада должен быть достаточно высоким. Если выход отдельного каскада составляет 95%, то БИС может содержать не более 90 каскадов, в то время как при 80%-ном выходе сложность большой интегральной схемы не может превышать 20 отдельных схем.

Рассуждения, приведенные выше, относятся к случаю одновременного изготовления всех каскадов большой интегральной схемы, что имеет место при использовании тонкопленочной или планарной технологии. Возможны другие пути изготовления БИС, в которых не требуется одновременного изготовления абсолютно совершенных элементов. Эти возможности будут рассмотрены ниже.

В процессе изготовления кремниевой интегральной схемы встречается большое количество серьезных дефектов. Прежде всего они содержатся в материале подложки. Исходная кремниевая пластинка имеет неровности и поликристаллические вкрапления на поверхности, поэтому пленка окисла, выращенная на этих областях, теряет свои защитные свойства. Этот тип дефектов известен как «проколы» окисла. Дефекты фотошаблонов, такие как царапины или загрязнения, приводят к вскрытию ненужных областей или препятствуют получению нужных окон в окисле.

Качество масок является чрезвычайно важным фактором, так как при изготовлении схемы требуется от шести до десяти фотолитографических операций. Другим источником непоправимых отказов яв-

ляются дефекты в металлизации. Нарушения металлизированного рисунка связаны с механическими повреждениями, присутствием на поверхности посторонних проводящих частиц и с дефектами фотошаблонов. Все это позволяет сделать вывод, что для изготовления больших интегральных схем требуется более высокий уровень развития технологии, чем для одиночных каскадов.

ВОПРОСЫ

1. **Главная проблема при изготовлении больших интегральных схем заключается в получении удовлетворительного . . . .**
2. **Для изготовления БИС из 100 каскадов необходимо, чтобы процент выхода на каскад был больше . . . .**
3. **Источниками непоправимых отказов в интегральных схемах являются структурные дефекты в материале подложки, дефекты масок, такие как . . . . и . . . ., и нарушения рисунка . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Главная проблема при изготовлении больших интегральных схем заключается в получении удовлетворительного **процента выхода.**
2. Для изготовления БИС из 100 каскадов необходимо, чтобы процент выхода на каскад был больше **95.**
3. Источниками непоправимых отказов в интегральных схемах являются структурные дефекты в материале подложки, дефекты масок, такие как **царапины** и **загрязнения**, и нарушения рисунка **металлизации.**

Пересечения. При изготовлении кремниевых интегральных схем проблема пересечений двух проводников является столь же острой, как и для других схем, расположенных в одной плоскости На рис. 7-8 показаны два способа решения этой проблемы. Наиболее

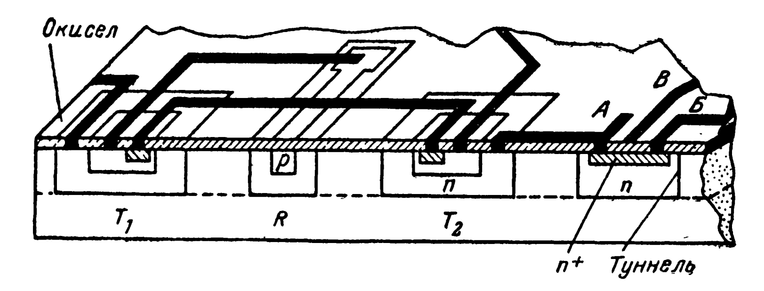


Рис. 7-8. Пересечения в интегральной монолитной схеме.

эффективный способ заключается в изготовлении такого топологического рисунка схемы, при котором токоведущие дорожки проходят над резистором. Резистор представляет собой один из проводников,

который, благодаря покрывающему его изолирующему окислу, не замыкается с проходящей над ним металлизированной дорожкой. На рисунке показана связь эмиттерных областей двух транзисторов, между которыми располагается резистор. Это возможно благодаря наличию окисла. В том случае, если резисторы не могут быть использованы, изготовляются специальные «туннели». Предположим, что необходимо соединить проводником точки *А* и *Б* без короткого замыкания с проводником *В*. Для этого на фотошаблоне предусматривается создание *n*-области между точками *А* и *Б*. Во время проведения эмиттерной диффузии в *n*-области создается n^+-слой с сопротивлением слоя примерно 3 Ом/кВ. Это обеспечивает получение резистора с малым сопротивлением или проводящего туннеля, соединяющего точки *А* и *Б*. Сопротивление туннеля составляет единицы ом. Туннели обычно используются для соединения частей схемы, где дополнительные сопротивления и емкость не приводят к ухудшению электрических характеристик.

Большие интегральные схемы, как правило, представляют собой соединение большого количества стандартных ячеек. Число различных схем в БИС сводится к минимуму, чтобы упростить процессы проектирования и изготовления масок. Следовательно, необходима некоторая топологическая гибкость для того, чтобы можно было избежать пересечений резисторов. Применение туннелей в больших интегральных схемах ограничивается случаями слаботочных систем и систем с малым быстродействием. Поэтому для соединения каскадов в БИС требуется разработка многослойной металлизации. Делается это следующим образом. Соединения в каждой ячейке выполняют обычными способами на исходной окисной пленке. Затем осаждается второй изолирующий слой, в качестве которого могут использоваться стекло, окислы, получаемые при низких температурах, и некоторые органические диэлектрики. На этот слой осаждается металл для соединения различных ячеек. Плотность расположения проводящих дорожек в этом случае существенно зависит от качества изолирующего слоя, т. е. числа «проколов» в нем.

ВОПРОСЫ

1. **Взаимные пересечения проводников в интегральных схемах исключаются за счет использования резисторов и . . . .**
2. **Соединение отдельных каскадов в большой интегральной схеме требует применения . . . . металлизации.**

ОТВЕТЫ

1. Взаимные пересечения проводников в интегральных схемах исключаются за счет использования резисторов и **туннелей.**
2. Соедиение отдельных каскадов в большой интегральной схеме требует применения **многослойной** металлизации.

Рассеяние мощности. Использование больших интегральных схем позволяет разместить очень большое число элементов в малом физическом объеме. Это приводит к существенному возрастанию мощности, рассеиваемой в единице объема, поэтому необходимо обращать серьезное внимание на конструкцию корпуса и крепление схемы для обеспечения соответствующего отвода тепла. Использование БИС

может привести к уменьшению мощности, потребляемой системой. Например, в логических схемах применение БИС способствует уменьшению паразитных емкостей, шунтирующих выходы отдельных каскадов, что позволяет получить необходимую скорость переключения при меньшем токе и меньшей потребляемой мощности по сравнению с каскадами на дискретных элементах. Если получение БИС основывается на технологии изготовления МОП-приборов (см. ниже), то мощность, потребляемая БИС, может быть меньше, чем мощность рассеяния отдельного обычного каскада.

7-4. ПУТИ СОЗДАНИЯ БИС

Очевидный, но наиболее сложный путь изготовления больших интегральных схем заключается в совершенствовании существующей технологии для получения приемлемого процента выхода годных элементов на достаточно большой по площади кремниевой пластине.

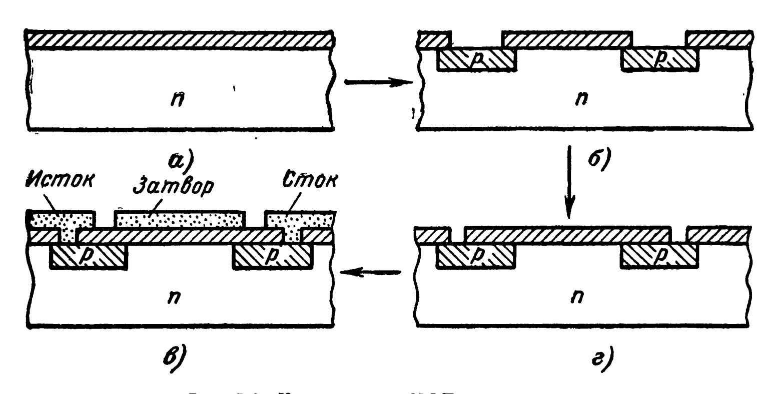


Рис. 7-9. Изготовление МОП-транзистора.

а — окисление; *б* — диффузия истока и стока; *в* — металлизация; *г* — вскрытие контактных окон.

Этот путь позволяет получить максимальную плотность упаковки, уменьшить количество технологических операций и сократить число тестовых испытаний.

100%-ный выход. Небольшие запоминающие ячейки и сложные арифметические устройства в вычислительных машинах могут успешно изготовляться на основе биполярной технологии со 100%-ным выходом. Постоянное совершенствование биполярной технологии приводит к постепенному усложнению БИС на биполярных транзисторах.

Использование схем со 100%-ным выходом может основываться на выборе очень простой и эффективной, с точки зрения получения годных приборов, технологии за счет некоторого ухудшения электрических характеристик изготовляемых элементов. Примером этого пути может служить использование приборов со структурой металл-окисел-полупроводник (МОП-приборов) для логических схем с невысоким быстродействием. Для изготовления МОП-транзистора

с p-каналом применяется относительно простая технология, показанная на рис. 7-9. После окисления пластины проводится вскрытие окон для диффузии в области стока и истока. Затем выращивается новый окисел и изготовляются контактные окна. Одновременно с осаждением металлических контактов к областям стока и истока на окисел между этими двумя областями наносится слой металла. Этот металлический электрод действует как управляющий затвор.

ВОПРОСЫ

1. **Использование БИС приводит к увеличению быстродействия при заданном уровне рассеиваемой мощности, так как в этом случае уменьшаются паразитные . . . . внутри отдельных каскадов.**
2. **Максимальная плотность упаковки и минимальное количество технологических операций при изготовлении БИС получаются при использовании . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Использование БИС приводит к увеличению быстродействия при заданном уровне рассеиваемой мощности, так как в этом случае уменьшаются паразитные **емкости** внутри отдельных каскадов.
2. Максимальная плотность упаковки и минимальное количество технологических операций при изготовлении БИС получаются при использовании **100%-ного выхода.**

Возможные дефекты при проведении диффузии в области истока и стока и получении металлизированного слоя для МОП-транзисторов не являются серьезными, если они не приводят к смыканию стока и истока или короткому замыканию или обрыву металлизированного слоя. Вследствие того что технология изготовления МОП-транзисторов имеет небольшое количество критических операций, использование МОП-приборов для получения 100%-ного выхода является вполне оправданным.

На рис. 7-10 показано типовое включение МОП-транзистора с p-каналом в схему. Если смещение на затворе равно нулю, то сопротивление между стоком и истоком очень большое. По мере того как напряжение $U_з$ становится более отрицательным, на поверхности

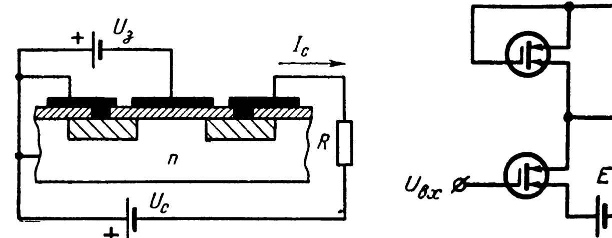


Рис. 7-10. Включение МОП-транзистора в схему.

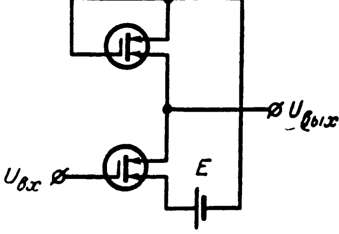


Рис. 7-11. МОП-инвертор.

подложки между стоком и истоком индуцируется канал *p*-типа, что приводит к уменьшению сопротивления между стоком и истоком. Если в закрытом состоянии это сопротивление составляет несколько мегом, то после возникновения канала сопротивление уменьшается до нескольких тысяч ом. Проводимость между стоком и истоком зависит от смещения на затворе, толщины окисла, ширины и длины канала. МОП-структура может служить в качестве резистора с большим сопротивлением в случае замыкания затвора на подложку, т. е. при нулевом смещении затвор — подложка. На рис. 7-11 показана схема простейшего инвертора на МОП-транзисторах. Форма транзисторов выбирается таким образом, чтобы МОП-резистор имел канал с меньшей шириной и большей длиной по сравнению с МОП-транзистором. Затвор МОП-резистора соединен со стоком. Когда входное напряжение равно нулю, оба транзистора в схеме действуют как резисторы. Вследствие того что активный транзистор имеет более узкий и более длинный канал, он имеет более высокое сопротивление, большая часть напряжения питания оказывается приложенной к транзистору и выходное напряжение практически равно *E*. Если входное напряжение сделать отрицательным, то сопротивление транзистора существенно уменьшается и выходное напряжение становится близким к нулю. Таким образом, при изменении входного напряжения от нуля до некоторой отрицательной величины напряжение на выходе изменяется от отрицательного значения до нуля, т. е. схема выполняет функцию инвертора. Используя параллельное и последовательное соединения таких инверторов, можно получить все логические функции, необходимые для цифровых и вычислительных машин. Такие функции будут выполняться при очень малой рассеиваемой мощности, так как МОП-инвертор потребляет небольшой ток, но скорость переключения таких устройств не очень высока. Большое сопротивление МОП-структур облегчает использование туннелей, в связи с чем проблема пересечений в МОП-интегральных схемах решается относительно просто. Поэтому нетрудно изготовить большие интегральные схемы на МОП-транзисторах, содержащие несколько сотен отдельных каскадов.

ВОПРОСЫ

1. **МОП-технология используется для изготовления БИС со 100%-ным выходом годных элементов, так как процесс производства МОП-транзисторов содержит небольшое количество . . . .**
2. **МОП-интегральные схемы выполняют сложные логические функции при очень малом . . . .**
3. **Большие номиналы эквивалентных резисторов в МОП-схемах приводят к ограничению . . . . этих схем.**

ОТВЕТЫ

1. МОП-технология используется для изготовления БИС со 100%-ным выходом годных элементов, так как процесс производства МОП-транзисторов содержит небольшое количество **критических операций.**
2. МОП-интегральные схемы выполняют сложные логические функции при очень малом **потреблении мощности.**
3. Большие номиналы эквивалентных резисторов в МОП-схемах приводят к ограничению **быстродействия** этих схем.

Выборочная сборка. Из всех интегральных схем, изготовленных на пластине, нормально функционируют лишь 20—70%. Процент выхода годных схем зависит, конечно, от сложности схемы и предъявляемых к ее функционированию требований. Тем не менее можно ожидать, что из 500 схем на одной плате будут нормально работать примерно 100. Если изготовить соответствующую маску для соединения всех годных схем, то можно получить выполнение сложной электронной функции из 100 каскадов на одной пластине. Выборочная сборка (рис. 7-12) при изготовлении БИС состоит в разработке технологии соединения только доброкачественных каскадов на пластине при общем проценте выхода менее 100%.

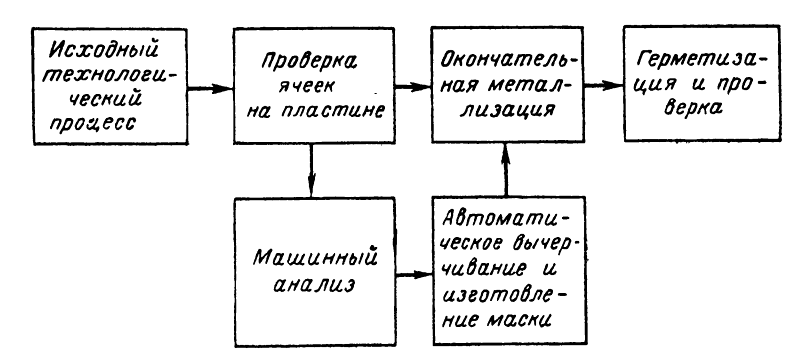


Рис. 7-12. Основные этапы изготовления БИС способом выборочной сборки.

Пластина, содержащая несколько сотен отдельных схем, металлизируется обычным способом, в результате чего каждая схема обеспечивается специальными контактами, которые позволяют проверять ее функционирование. Затем все схемы на пластине последовательно проверяются с помощью многоконтактного зонда, связанного с вычислительной машиной, по автоматически задаваемой программе. Расположение годных схем фиксируется вычислительной машиной. Конфигурация требуемой электронной системы заранее вводится в память вычислительной машины. Входные данные с зонда анализируются по специальной программе и машина определяет оптимальное соединение отдельных ячеек в БИС. Выходные данные с вычислительной машины используются для автоматического вычерчивания маски и ее изготовления. При соответствующих затратах на разработку рассмотренной системы время изготовления маски для каждой пластины может быть уменьшено до нескольких часов. После соединения годных ячеек в сложный функциональный блок проводится герметизация БИС и окончательная проверка функционирования схемы.

Рассмотренный выше способ легко может быть описан, но требует достаточно много усилий для практической реализации. Число возможных вариантов размещения 100 годных схем из 500 на пластине практически безгранично. Оно равно примерно единице со 106 нулями. Даже самая быстродействующая вычислительная машина способна решить лишь часть этой задачи, поэтому рассмотре-

ние всех возможных вариантов практически невыполнимо. Кроме того, существует вероятность отказа отдельных ячеек во время окончательной сборки. Недостатки этого способа заключаются в чрезвычайно высоких затратах на оборудование и инженерное обслуживание, приходящиеся на одну схему. Тем не менее, если необходимо создать БИС со сложностью примерно 100 ячеек на основе биполярной технологии, то метод выборочной сборки позволяет получить такую схему на одной кремниевой пластине.

ВОПРОСЫ

1. **БИС может быть получена на пластине с низким процентом выхода годных ячеек, если использовать способ ....**
2. **Способ выборочной сборки не может быть использован без помощи ....**

ОТВЕТЫ

1. БИС может быть получена на пластине с низким процентом выхода годных ячеек, если использовать способ **выборочной сборки.**
2. Способ выборочной сборки не может быть использован без помощи **вычислительной машины.**

Гибридный способ. Гибридный или многоэлементный способ изготовления БИС — сочетание пленочной и полупроводниковой технологии для создания сложных схем в минимальном объеме. Он заключается в использовании кремниевой планарной технологии для изготовления отдельных ячеек БИС с последующим их соединением при помощи толсто- или тонкопленочной техники на изолирующей подложке. Основные технологические этапы изготовления гибридной схемы показаны на рис. 7-13. Изготовление, контроль и разделение подложки на отдельные пластинки осуществляются обычным способом. На изолирующую подложку с помощью толсто- или тонкопленочной технологии наносится необходимый рисунок соединений.

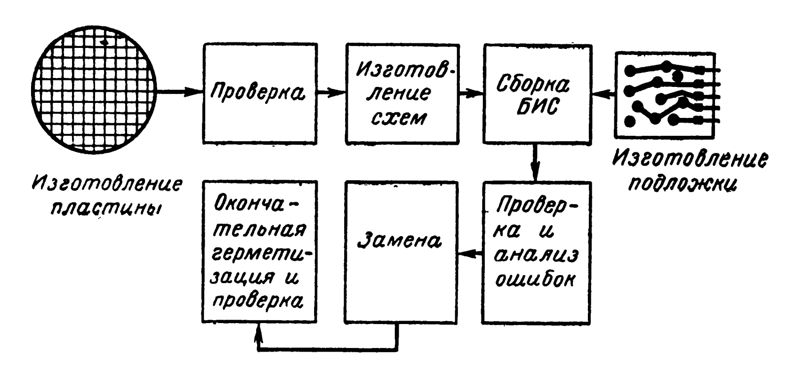


Рис. 7-13. Получение БИС гибридным способом.

Отдельные пластинки располагаются на поверхности подложки вверх или вниз схемой. В первом случае для соединения контактных площадок схемы с токоведущими дорожками на подложке может использоваться обычная термокомпрессионная или ультразвуковая сварка Если схема монтируется лицевой стороной вниз, то для ее соединения с подложкой удобно применять способы «балочных выводов» или «перевернутого монтажа». Если в схеме необходимы большие номиналы резисторов и конденсаторов, они могут быть получены в процессе подготовки подложки. После сборки БИС проверяется и определяются возможные дефекты. Главное достоинство гибридного способа состоит в том, что после обнаружения дефектов негодные схемы могут быть заменены. Это означает, что даже если процент выхода на этапе сборки меньше 100, то после соответствующей доработки можно получить совершенно работоспособную систему. Гибридный способ особенно выгоден в тех случаях, когда есть необходимость в нескольких сильно различающихся видах БИС.

ВОПРОСЫ

1. **Главные проблемы при изготовлении больших интегральных схем (БИС) состоят в достижении высокого процента выхода годных схем при приемлемом уровне стоимости.**
   а) **Процент выхода на каскад в большой интегральной схеме . . . . , чем для отдельного каскада.**
   б) **Для изготовления БИС требуется от . . . . до . . . . фотолитографических операций.**
   в) **Два проводника, проходящие через одну и ту же точку в плоскости схемы, образуют . . . .**
2. **Использование больших интегральных схем не облегчает миниатюризацию электронных систем, а уменьшает стоимость и повышает надежность систем за счет уменьшения связей на плате.**
   а) **Большая интегральная схема выполняет функцию . . . . в одном корпусе.**
   б) **Использование МОП-структур является примером изготовления БИС со . . . . годных элементов.**
   в) **Другие способы получения БИС состоят в использовании . . . . сборки и применении многоэлементного . . . . . . способа.**

ОТВЕТЫ

1. *а*) Процент выхода на каскад в большой интегральной схеме **выше**, чем для отдельного каскада.
   б) Для изготовления БИС требуется от **6** до **10** фотолитографических операций.
   в) Два проводника, проходящие через одну и ту же точку в плоскости схемы, образуют **пересечение.**
2. *а*) Большая интегральная схема выполняет функцию **нескольких каскадов** в одном корпусе.
   б) Использование МОП-структур является примером изготовления БИС со **100%-ным выходом** годных элементов.
   в) Другие способы получения БИС состоят в использовании **выборочной** сборки и применении многоэлементного **гибридного** способа.

Глава восьмая

ТИПОВЫЕ МИКРОМИНИАТЮРНЫЕ СХЕМЫ

В этой главе дан обзор основных типов цифровых и линейных структур, используемых в микроэлектронике. Описаны схемные функции, необходимые для создания цифровых устройств. Способы, которыми эти функции могут быть реализованы, даны в сравнительной оценке для различных типов интегральной логики. Рассмотрены некоторые возможности использования интегральных схем в линейных системах и приведены характеристики некоторых линейных схем.

8-1. ЦИФРОВЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ СТРУКТУРЫ

Цифровые вычислительные машины — это системы обработки информации. Так как обработка информации в машине осуществляется электронными средствами, то необходимы входные и выходные преобразователи. На рис. 8-1 показаны некоторые типы таких пре-

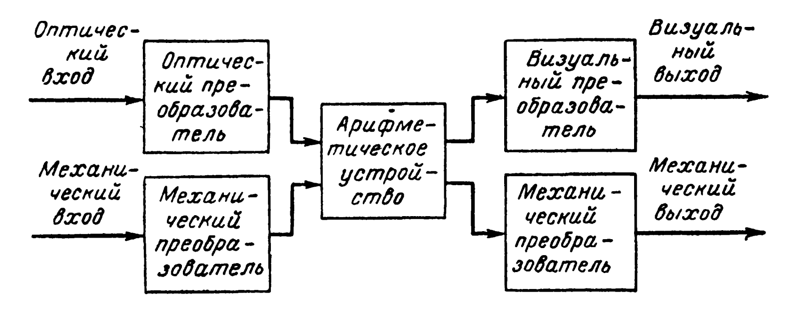


Рис. 8-1. Структурная схема вычислительной машины.

образователей. Ввод данных в машину может осуществляться механическим способом с помощью перфокарт или перфолент, оптическим способом при нанесении темных и светлых пятен на пленку или электронным способом с помощью электрических сигналов, поступающих с магнитной ленты. В последнем случае входные данные могут вводиться непосредственно в арифметическое устройство, но чаще всего требуется преобразование информации в требуемый для машины код. Для того чтобы результаты решения были понятны человеку, на выходе вычислительной машины также необходимо осуществлять преобразование электрических сигналов в неэлектрическую форму. Вывод информации на печать является примером механического способа, использование кинескопа или цифровой индикации представляет собой пример оптического вывода информации из вычислительной машины. Все эти системы требуют для своей работы дополнительного оборудования, так как скорость обработки информации в арифметическом устройстве может в несколько миллионов раз превышать скорость работы внешних устройств.

Для обработки в арифметическом устройстве вся информация должна быть представлена в виде чисел. Чаще всего используется двоичная, а не десятичная форма представления числа, так как в этом случае необходимо использовать только две цифры — нуль и единицу. Например, двоичной формой десятичного числа 73 является 1001001. Для представления двоичных чисел в электрической форме требуется лишь два состояния электронных схем. При этом 0 или 1 будут соответствовать низкому или высокому уровням напряжения в схеме. Простота и надежность схем для выполнения этих функций позволяют создавать сложные электронные системы.

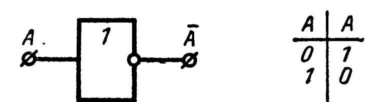


Рис. 8-2. Условное изображение и таблица истинности инвертора.

Логические функции. Передача и обработка информации в вычислительной машине осуществляются с помощью специальных логических функций. Основные виды логических функций реализуются с помощью инверторов, триггеров и логических элементов типов И и ИЛИ. Любая сложная функция, необходимая для работы вычислительной машины, может быть выполнена с помощью комбинации этих основных элементов.

Функция инверсии (отрицания). На рис. 8-2 показаны условное изображение и таблица истинности функции инверсии. Таблица истинности содержит все возможные комбинации входной и выходной величин. Символ A обозначает вход инвертора. В двоичной системе величина A может принимать только два значения: 0 или 1. На выходе получается инвертированная величина $\bar{A}$ (не A). Согласно таблице истинности 0 на входе соответствует 1 на выходе и 1 на входе соответствует 0 на выходе.

ВОПРОСЫ

1. **Числа в двоичной форме представляются комбинацией . . . и . . . .**
2. **Передача и обработка информации в вычислительной машине осуществляются с помощью . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Числа в двоичной форме представляются комбинацией **нулей и единиц.**
2. Передача и обработка информации в вычислительной машине осуществляются с помощью **логических функций.**

Функция И. Условное изображение и таблица истинности двухвходового логического элемента, выполняющего функцию И, показаны на рис. 8-3. Выражение AB читается A и B. В двоичной системе исчисления значения A и B могут быть равны только 0 или 1. Смысл функции И соответствует следующему определению: 1 на выходе элемента появляется только в том случае, если на обоих входах присутствует 1. Элемент, изображенный на рисунке, имеет два вхо-

да или две входные переменные. В общем случае число входов может быть любым. Однако всегда выход будет соответствовать 0, если хотя бы на одном входе будет присутствовать 0.

Функция ИЛИ. Реализация функции ИЛИ показана на рис. 8-4. Выражение $A+B$ читается: «A или B». Функция ИЛИ соответствует определению: 1 на выходе элемента появляется в том случае, если хотя бы на одном входе присутствует 1. Из таблицы истинности следует, что выход соответствует 1, если или A, или B равны 1. Нуль на выходе устанавливается только тогда, когда оба входа соответствуют 0. Элемент, выполняющий функцию ИЛИ, может иметь любое количество входов и его выход будет всегда соответствовать 1, если хотя бы на одном из входов присутствует 1.

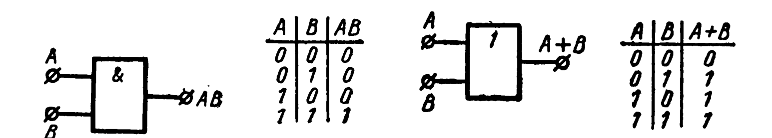


Рис. 8-3. Условное изображение и таблица истинности логического элемента И.

Рис. 8-4. Условное изображение и таблица истинности логического элемента ИЛИ.

Комбинация логических элементов. Выполнение сложных функциональных преобразований в вычислительной машине обычно осуществляется с помощью комбинации элементарных логических функций. При этом целесообразно уменьшать число различных логических схем с тем, чтобы все функции могли выполняться на основе минимального числа простейших логических элементов. Число элементарных логических функций равно двум, а не трем. Действительно, функция ИЛИ может быть реализована с помощью функции инверсии и функции И, а комбинация инверсии и функции ИЛИ позволяет получить функцию И. На рис. 8-5 показано преобразование функции ИЛИ в функцию И с помощью инверсии. Анализ входных и выходной колонок таблицы истинности приведенной логической схемы показывает, что они совпадают с таблицей истинности для функции И на рис. 8-3. Таким образом элементарными логическими функциями можно считать функцию инверсии и одну из функций И или ИЛИ.

На рис. 8-6 показаны логические схемы, выполняющие функции НЕ — И и НЕ — ИЛИ. Эти схемы эквивалентны последовательному соединению элементов, выполняющих функции И, ИЛИ, и инверторов. Простейшие логические схемы могут быть реализованы на транзисторах, которые обычно инвертируют входной сигнал, поэтому выполнение функций НЕ — И и НЕ — ИЛИ с практической точки зрения легче, чем создание функций И и ИЛИ. По этой причине в вычислительных машинах используются главным образом логические функции типа НЕ — И и НЕ — ИЛИ.

ВОПРОСЫ

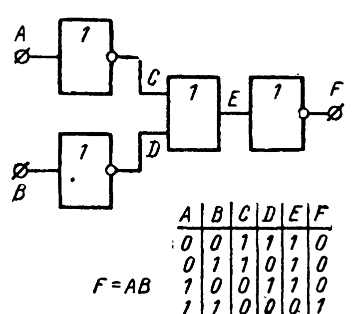
1. **Выход элемента, выполняющего функцию И, соответствует 1, если на всех его входах присутствует . . . .**

2. **Выход элемента, выполняющего функцию ИЛИ, соответствует 1, если на .... из его входов присутствует 1.**
3. **Элемент, выполняющий функцию И, может быть собран из элемента типа ИЛИ и нескольких ....**
4. **В вычислительных машинах часто используется логическая схема типа ...., представляющая собой комбинацию элемента типа И и инвертора.**

ОТВЕТЫ

1. Выход элемента, выполняющего функцию И, соответствует 1, если на всех его входах присутствует **1**.
2. Выход элемента, выполняющего функцию ИЛИ, соответствует 1, если на **любом** из его входов присутствует 1.
3. Элемент, выполняющий функцию И, может быть собран из элемента типа ИЛИ и нескольких **инверторов.**
4. В вычислительных машинах часто используется логическая схема типа **НЕ — И**, представляющая собой комбинацию элемента типа И и инвертора.

Триггеры. В описанных логических схемах состояние на выходе полностью определяется состояниями на входах. При изменении входных уровней изменяется уровень на выходе. Однако для того чтобы использовать вычислительную машину в качестве эффективного вычислительного «инструмента», необходимы средства для хранения информации в форме 0 и 1, когда входные сигналы отсутствуют. Это достигается созданием электронных схем, которые имеют два устойчивых состояния. Одно состояние может представлять 1, а другое 0. Такие схемы носят название *бистабильных ячеек.*



A	B	C	D	E	F
0	0	1	1	1	0
0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	1	0
1	1	0	0	0	1

Рис. 8-5. Выполнение функции И с помощью инверсии и функции ИЛИ.

Бистабильные ячейки, которые могут переключаться из одного состояния в другое, называются *триггерами.* На рис. 8-7 показан способ создания триггера с помощью комбинации элементов типа ИЛИ и инверторов. Цифры в квадратиках обозначают уровни логических сигналов для рассматриваемого момента времени. Принцип работы схемы заключается в следующем. Предположим, что на входах триггера R и S сигналы отсутствуют. Кроме того, будем считать, что исходное состояние схемы соответствует 0 на верхнем входе левого логического элемента. До тех пор пока на одном из входов

левого элемента не появится 1, состояние его выхода или точки A будет соответствовать 0. Этот уровень инвертируется с помощью инвертора и поэтому на верхний вход правого логического элемента подается 1. Так как присутствие 1 на любом входе элемента типа ИЛИ приводит к появлению 1 на его выходе, то точка B в исходном состоянии будет находиться в положении, соответствующем 1. Инвертор, следующий за точкой B, инвертирует эту 1 в 0 и передает его на вход левого логического элемента типа ИЛИ. Таким образом, получается исходное состояние, при котором на обоих входах левого элемента присутствуют 0.

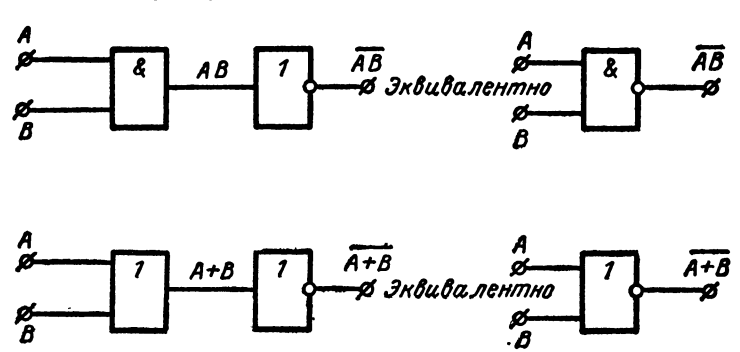


Рис. 8-6. Логические элементы, выполняющие функции НЕ—И и НЕ—ИЛИ.

Так как в стационарных условиях логические уровни остаются неизменными, то первоначально установленное состояние будет сохраняться бесконечно долго. Если выход A использовать для определения положения триггера, то описанное выше состояние будет соответствовать условию хранения триггером 0.

Если начальные условия соответствуют присутствию 1 на верхнем входе левого логического элемента, то нетрудно показать, что триггер снова будет находиться в устойчивом состоянии, причем на выходе A будет 1, а на выходе B — 0. Так как положение точки A определяет состояние триггера, то в этом случае триггер будет находиться в состоянии 1.

Рассмотрим процесс переключения триггера из одного состояния в другое, когда выход A находится в состоянии 0. Если на вход S (нижний вход левого элемента ИЛИ) подана 1, то выход A перейдет в состояние 1. Инвертор преобразует эту 1 в 0, после чего на верхнем входе правого элемента будет уровень, соответствующий 0. Так как на обоих входах этого элемента будут присутствовать 0, то выход B перейдет в состояние 0. Этот 0 инвертируется в 1 и подается на верхний вход левого элемента, переводя его выход в стабильное состояние, соответствующее 1, если даже сигнал на входе S прекращается.

Можно показать, что для перевода триггера в состояние 0 необходимо подать 1 на вход R. Таким образом, триггер может хранить или 0 или 1. Если нужно записать 1, то 1 должна быть приложена ко входу S (установка). Если требуется хранить 0, то 1 должна быть

приложена ко входу R (сброс). Описанный триггер носит название RS-триггера.

На рис. 8-8, *а* показано символическое изображение RS-триггера. Состояние триггера определяется логическим уровнем на выходе A. Уровень выхода B будет всегда противоположным. Существует большое количество комбинаций элементов, реализующих функцию би-

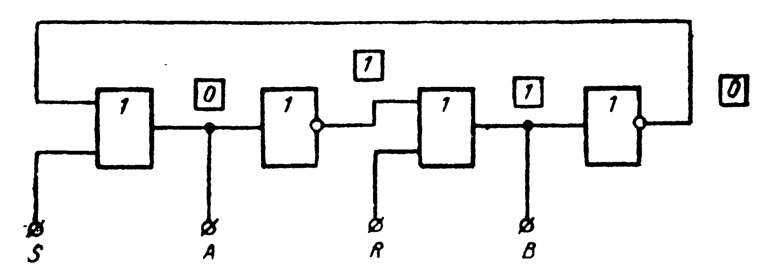


Рис. 8-7. Схема с двумя устойчивыми состояниями.

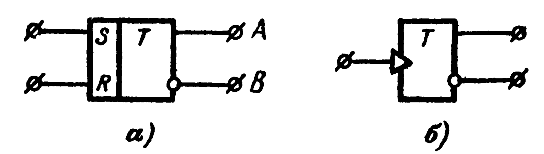


Рис. 8-8. Условное изображение триггеров.

а — RS-триггер, *б* — счетный триггер

стабильной ячейки. Характерным признаком всех этих схем является то, что с выхода каждого элемента подается обратная связь на вход другого.

Соединяя входы R и S и добавляя несколько других элементов, основной RS-триггер можно модифицировать в логический элемент, называемый *счетным триггером* Символическое изображение этого элемента показано на рис. 8-8, *б* Основное свойство счетного триггера заключается в том, что каждый импульс, подаваемый на тактовый вход T, переводит триггер в состояние, противоположное исходному. Последовательность входных импульсов приводит к поочередному переходу 1 от одного выхода триггера к другому. Последовательное соединение нескольких счетных триггеров позволяет получить счетчик входных импульсов.

ВОПРОСЫ

1 **Бистабильные ячейки необходимы в цифровых вычислительных машинах для ...... информации.**
2 **Для получения могут быть использованы два логических элемента типа ИЛИ и два инвертора.**
3. **Запись 0 в RS-триггере обеспечивается подачей 1 на вход ....**

4. **Необходимое условие для получения RS-триггера с помощью соединения нескольких элементов состоит в том, что с выхода каждого элемента подается обратная связь на .... другого.**
5. **Каждый импульс на тактовом входе изменяет состояние счетного триггера на состояние, ... исходному.**

ОТВЕТЫ

1. Бистабильные ячейки необходимы в цифровых вычислительных машинах для **хранения** информации.
2. Для получения **триггера** могут быть использованы два логических элемента типа ИЛИ и два инвертора.
3. Запись 0 в RS-триггере обеспечивается подачей 1 на вход **сброса**.
4. Необходимое условие для получения RS-триггера с помощью соединения нескольких элементов состоит в том, что с выхода каждого элемента подается обратная связь **на вход** другого.
5. Каждый импульс на тактовом входе изменяет состояние счетного триггера на состояние, **противоположное** исходному.

На рис. 8-9 показана схема двоичного счетчика, полученного путем соединения трех счетных триггеров. Предположим, что исходное

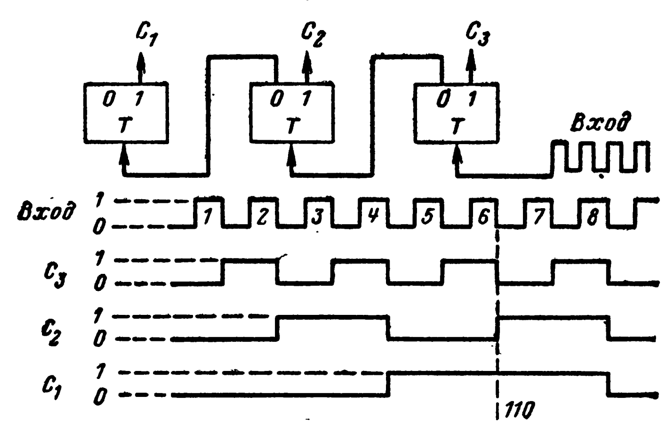


Рис. 8-9. Три каскада двоичного счетчика.

состояние схемы соответствует 0 на выходах C_1, C_2 и C_3, а на вход подается последовательность импульсов. Первый импульс записывает 1 в C_3. Второй импульс, переводя C_3 в 0, записывает 1 в C_2. Следующий импульс переводит C_3 снова в 1, но без изменения состояния выхода C_2. Четвертый импульс переводит C_3 и C_2 в 0, в результате чего появляется импульс, изменяющий состояние C_1 в 1. Рассмотрим состояния триггеров после шестого импульса. На выходе C_1 будет 1,

на выходе C_2 1, а на выходе C_3 0. Если эти положения использовать как цифры двоичного числа, то в счетчике будет записано число 110, что соответствует двоичному эквиваленту десятичного числа шесть. Таким образом, выходные состояния последовательно соединенных счетных триггеров автоматически дают сумму числа входных импульсов в двоичном коде.

Логические элементы, описанные выше, каждый в отдельности и в комбинации с другими элементами, позволяют выполнять все необходимые арифметические операции в цифровых вычислительных машинах.

8-2. ТРАНЗИСТОРНЫЕ ЦИФРОВЫЕ СХЕМЫ

Анализ основных логических функций показывает, что для их получения необходимо иметь два уровня электрических сигналов, соответствующих 1 и 0. Кроме того, необходимо уметь конструировать логические элементы. Если имеется логическая схема, выпол-

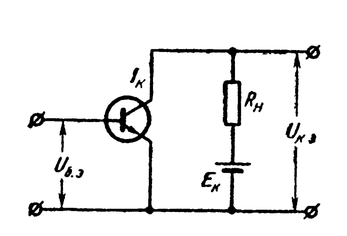


Рис. 8-10. Транзисторный ключ.

Рис. 8-11. Выходная характеристика транзистора.

няющая функцию НЕ — И, то все другие функции, требуемые для работы вычислительной машины, могут быть построены на комбинации этого основного элемента. Ниже будут рассмотрены транзисторные схемы, которые разработаны для выполнения основных логических операций.

На рис. 8-10 показана схема простейшего транзисторного ключа, который позволяет получать два уровня напряжений, соответствующих двум логическим уровням. Транзистор в схеме является обычным кремниевым биполярным транзистором. Если напряжение на входе транзистора между базой и эмиттером меньше 0,7 В, то в базовой цепи при комнатной температуре ток отсутствует. Поэтому отсутствует ток в коллекторной цепи и падение напряжения на резисторе равно нулю. Выходное напряжение между коллектором и эмиттером в этом случае будет равно напряжению питания $E_к$. Если напряжение на базе увеличивается до значения, достаточного для возникновения базового тока, то соответствующий ток коллектора приводит к уменьшению выходного напряжения.

На рис. 8-11 показано соотношение между коллекторным током и напряжением коллектор — эмиттер для двух различных нагрузочных сопротивлений. Считается, что в базовой цепи открытого транзистора протекает ток. Когда входное напряжение ключа меньше

порога включения, то напряжение коллектор — эмиттер соответствует точке *C*. Для открытого состояния выходное напряжение уменьшается. В случае нагрузки $R_{н1}$ напряжение коллектор — эмиттер будет соответствовать точке *B*. При увеличении нагрузочного сопротивления выходное напряжение уменьшается и точка *B* сдвигается влево к пунктирной вертикальной прямой. Область левее пунктирной линии называется *областью насыщения*. Падение напряжения между коллектором и эмиттером в этой области для биполярных транзисторов составляет 0,2—0,3 В. Типовое значение напряжения питания 4 В. Поэтому при отпирании транзисторного ключа выходное напряжение будет изменяться от 4 до 0,3 В. Эти два уровня и выбираются как логические уровни в цифровых вычислительных машинах.

Дополнительное требование к цифровым схемам в вычислительных машинах заключается в том, чтобы их выходные напряжения могли служить входными уровнями при последовательном соединении каскадов. Это условие выполняется в рассмотренном транзисторном ключе. Напряжение 4 В более чем достаточно для включения транзистора в следующем каскаде, а уровень 0,3 В заметно меньше порога включения следующего транзистора.

Если считать, что логическая 1 соответствует 4 В, а логический 0 — 0,3 В, то не трудно видеть, что при 1 на входе выходное напряжение ключа равно 0, а при входном 0 выход соответствует 1. Таким образом, транзисторный ключ выполняет функцию инвертора.

ВОПРОСЫ

1. **Ток база — эмиттер в обычном кремниевом транзисторе достаточно мал, пока его входное напряжение не превышает . . . . В.**
2. **В области . . . . напряжение коллектор — эмиттер транзистора составляет несколько десятых долей вольта.**

ОТВЕТЫ

1. Ток база — эмиттер в обычном кремниевом транзисторе достаточно мал, пока его входное напряжение не превышает **0,7** В.
2. В области **насыщения** напряжение коллектор — эмиттер транзистора составляет несколько десятков долей вольта.

Транзисторная логика с резистивными связями (РТЛ). На основе рассмотренного выше транзисторного ключа может быть собрана схема трехвходового логического элемента (рис. 8-12). Если на всех трех входах установлены низкие уровни напряжения, то транзисторы закрыты и выходное напряжение схемы равно напряжению питания. Если на одном из входов *A*, *B* или *C* появится высокий уровень, то соответствующий транзистор откроется и напряжение на выходе схемы уменьшится до напряжения насыщения.

Не трудно видеть, что полученная схема выполняет функции инвертора и логического элемента ИЛИ с тремя входами, т. е. функцию трехвходового элемента НЕ — ИЛИ. Эта схема является типовым элементом резистивно-транзисторной логики (РТЛ), работающим в режиме насыщения. РТЛ получается достаточно просто на основе обычной планарной технологии, так как состоит из нескольких

транзисторов, соединенных параллельно с небольшим числом изолированных областей для резисторов. Кроме того, схема работает при малых уровнях напряжений. Все это позволяет получать достаточно высокий процент выхода годных элементов. На основе РТЛ интегральных схем могут быть получены все основные логические элементы, триггеры, счетчики и т. п.

Передаточная характеристика, т. е. зависимость изменения выходного напряжения от напряжения на входе элемента РТЛ, показана на рис. 8-13. Транзистор закрыт и его выходное напряжение равно напряжению источника питания до тех пор, пока напряжение на входе не превышает порогового значения, при котором транзистор

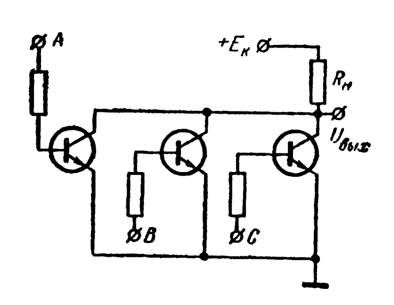


Рис. 8-12. Трехвходовой элемент РТЛ.

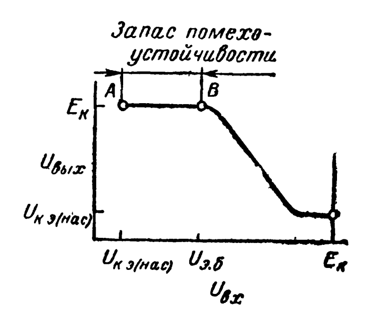


Рис. 8-13. Передаточная характеристика элемента РТЛ.

открывается (напряжение, начиная с которого во входной цепи протекает ток). По мере дальнейшего увеличения входного напряжения напряжение на выходе будет уменьшаться, стремясь в пределе к напряжению насыщения.

Так как вход любого элемента соединяется с выходом другого аналогичного элемента, то входное напряжение в реальной схеме будет изменяться от $U_{к:э(нас)}$ до $E_к$. Когда входные транзисторы закрыты, то схема находится в состоянии, соответствующем точке *A*. Расстояние между точками *A* и *B* соответствует амплитуде входного сигнала, который может переключить логический элемент. Обычно сигнал переключения существенно больше этой минимальной величины. Если же в системе, где работает элемент, имеются случайные импульсы помехи, приходящие на вход схемы, то они не влияют на состояние элемента до тех пор, пока их амплитуда меньше напряжения, соответствующего точке *B*. Таким образом, запас по «помехе» или помехоустойчивость элемента определяется расстоянием между точками *A* и *B*. Для всех элементов РТЛ это напряжение равно разности между пороговым напряжением перехода база — эмиттер и напряжением насыщения коллектор — эмиттер. Эта разница обычно составляет 0,3—0,4 В и уменьшается при увеличении температуры Скорость переключения схем РТЛ ограничена резисторами в базовых цепях. Поэтому основная область использования схем РТЛ — это системы малого быстродействия, не требующие высокой помехоустойчивости.

ВОПРОС

Элементы РТЛ могут быть легко изготовлены в интегральном виде, так как эти схемы работают при . . . . напряжениях и для них требуется небольшое количество . . . . областей.

ОТВЕТ

Элементы РТЛ могут быть легко изготовлены в интегральном виде, так как эти схемы работают при низких напряжениях и для них требуется небольшое количество **изолированных** областей.

Диодно-транзисторная логика (ДТЛ). На рис. 8-14 показана типовая схема трехвходового логического элемента НЕ — И, относящегося к элементам диодно-транзисторной логики. Принцип работы

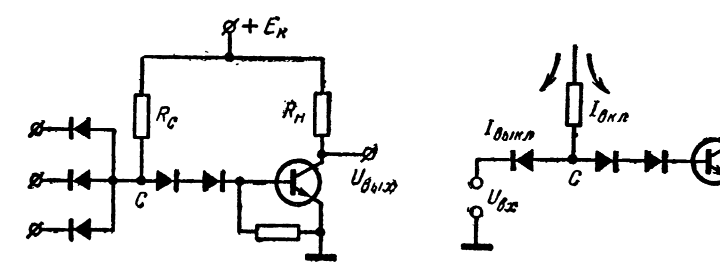


Рис. 8-14. Трехвходовой элемент ДТЛ.

Рис. 8-15. Действие элемента ДТЛ.

схемы поясняется с помощью рис. 8-15. Рассмотрим ток, протекающий через резистор R_c. Если ток после точки C течет вправо, то транзистор открывается и на его выходе устанавливается напряжение насыщения. Если ток ответвляется влево в один из входных диодов, то транзистор закрыт и его коллекторное напряжение равно напряжению питания. Ток будет ответвляться в ту сторону, где напряжение меньше.

При движении вправо току необходимо пройти через три диода, прежде чем достичь земляной шины. При движении влево ток должен преодолеть один диод и входное напряжение. Если входное напряжение больше падения напряжения на двух диодах, то ток будет двигаться вправо. Если входное напряжение меньше удвоенного напряжения на диоде, то ток ответвляется влево, закрывая транзистор. Как и в случае элемента РТЛ, закрытое состояние будет соответствовать случаю, когда на входе напряжение равно напряжению насыщения транзистора, т. е. не превышает 0,3 В. Так как прямое падение напряжения на диоде составляет около 0,7 В, то на двух диодах выделяется напряжение 1,4 В. Запас помехоустойчивости в этом случае будет составлять 1,4 В минус 0,3 В, т. е. 1,1 В. Если требуется повысить запас помехоустойчивости, то в базовую цепь транзистора необходимо включить большее число диодов.

Кроме лучшей помехоустойчивости элемент ДТЛ имеет большее быстродействие. Это связано с тем, что после отпирания диодов ток в базовой цепи имеет большое значение и быстрее отпирает транзистор.

Все основные логические схемы могут быть выполнены с использованием интегрального элемента ДТЛ. Рассмотренная схема широко используется в цифровых системах среднего быстродействия. Элемент ДТЛ очень популярен в форме, выполненной на дискретных элементах и в гибридной микроэлектронной форме. В этих областях специальный подбор элементов с малыми допусками позволяет получать максимальное быстродействие при заданном уровне рассеиваемой мощности.

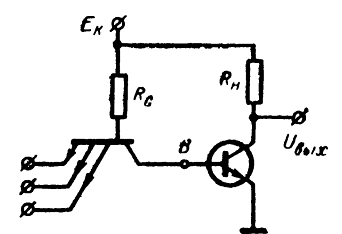


Рис. 8-16. Трехвходовой элемент ТТЛ.

Транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ). На рис. 8-16 показан основной элемент транзисторно-транзисторной логики. Принцип работы схемы во многом аналогичен работе элемента ДТЛ. Ток после резистора R_c ответвляется или вправо на вход транзистора, или влево в специальный многоэмнттерный транзистор, каждый эмиттер которого действует подобно входному диоду. Отличие от схемы ДТЛ заключается в том, что падение напряжения между точкой *B* и входом равно напряжению коллектор — эмиттер многоэмиттерного транзистора. Когда транзистор открыт, то указанное падение напряжения составляет примерно 0,2 В, тогда как в схеме ДТЛ оно равно 0,7 В. Это позволяет повысить быстродействие схемы при включении.

Кроме того, переход эмиттер — база в многоэмиттерном транзисторе может открываться быстрее, чем простой диод. Поэтому схемы ТТЛ являются самыми быстродействующими из насыщенных логических схем. Помехоустойчивость основного элемента ТТЛ хуже по сравнению со схемой ДТЛ, поэтому в базовую цепь второго транзистора обычно включаются диоды. Эта и другие модификации позволяют повысить запас помехоустойчивости схемы ТТЛ за счет потери в быстродействии.

Во многих случаях параметры схем ДТЛ и ТТЛ одинаковы, а имеющиеся отличия определяются лишь некоторой разницей в проектировании. Характерной чертой схем ТТЛ является многоэмиттерный транзистор. Так как подобный транзистор не имеет аналогов в дискретном виде, то изготовление схем ТТЛ ограничивается главным образом монолитной интегральной формой.

ВОПРОСЫ

1. **Схемы ДТЛ имеют хорошую помехоустойчивость, так как в . . . . цепь транзистора включаются несколько последовательно соединенных диодов.**

2. **Для схем ДТЛ характерны хорошая помехоустойчивость, высокое быстродействие и малая . . . .**
3. **Основной элемент ТТЛ имеет большее быстродействие по сравнению с элементом ДТЛ, но уступает последнему в . . . .**
4. **Для создания схем ТТЛ необходима разработка . . . . транзисторной структуры.**

ОТВЕТЫ

1. Схемы ДТЛ имеют хорошую помехоустойчивость, так как в **базовую** цепь транзистора включаются несколько последовательно соединенных диодов.
2. Для схем ДТЛ характерны хорошая помехоустойчивость, высокое быстродействие и малая **рассеиваемая мощность.**
3. Основной элемент ТТЛ имеет большее быстродействие по сравнению с элементом ДТЛ, но уступает последнему в **запасе помехоустойчивости.**
4. Для создания схем ТТЛ необходима разработка **многоэмиттерной** транзисторной структуры.

Ненасыщенные схемы. Импульс проходит через любой логический элемент с некоторой задержкой. На рис. 8-17 показаны импульсы до и после инвертирующего транзисторного элемента. Предполо-

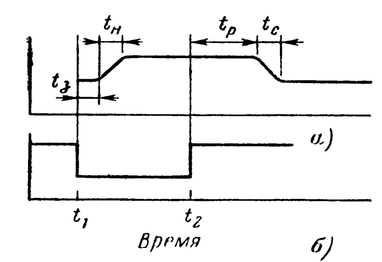


Рис 8-17. Задержка прохождения импульса.

а — выходной импульс; *б* — входной импульс.

жим, что входной импульс мгновенно нарастает в момент t_1 и мгновенно спадает в момент t_2.

Общее время задержки состоит из четырех составляющих. Время $t_з$ необходимо для зарядки емкости перехода эмиттер — база до 0,7 В, после чего переход начинает проводить ток. Время нарастания $t_н$ зависит от быстродействия транзистора, паразитных емкостей и амплитуды сигнала запуска. Время $t_р$ равно времени рассасывания носителей. Если схема имеет ненасыщенные транзисторы, то время рассасывания равно нулю Время спада, как и время нарастания, зависит от свойств транзистора, емкостей и условий переключения. Время рассасывания обычно занимает значительную часть общего времени задержки и поэтому для увеличения быстродействия необходимо избегать насыщения транзисторов.

Транзисторная логика с эмиттерной связью (ЭСЛ). Примером ненасыщенных схем являются схемы с эмиттерной связью или токовые переключатели Типовая логическая схема с эмиттерной связью представлена на рис 8-18. Через резистор $R_э$ от источника $E_э$ проте-

кает постоянный ток. Этот ток протекает или в левый или в правый транзистор. Если ток проходит через правую часть схемы, то за счет падения напряжения на резисторе R_2 на выходе появляется напряжение — IR_2. В схеме на рис. 8-18 величины I и R_2 выбраны таким образом, чтобы выходное напряжение было равно — 1 В. Когда ток протекает в левый транзистор, то падение напряжения на R_2 и, следовательно, выходное напряжение равны нулю. Таким образом, напряжение на выходе изменяется от 0 до — 1 В. Так как эмиттеры транзисторов соединены вместе, то ток будет протекать через тот транзистор, база которого имеет больший положительный потенциал. База транзистора T_2 находится под постоянным опорным напряжением.

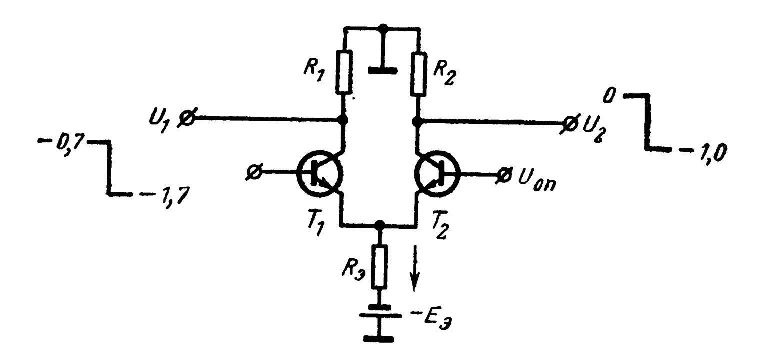


Рис. 8-18. Схема с эмиттерной связью (токовый переключатель).

В рассматриваемом примере опорное напряжение равно — 1,2 В, а входной переключающий сигнал на базе левого транзистора изменяется от — 0,7 до — 1,7 В. Так как напряжение — 0,7 В более положительно, чем напряжение — 1,2 В, то ток будет протекать через транзистор T_1, если входное напряжение равно — 0,7 В. Ввиду того что напряжение — 1,7 В менее положительно, чем напряжение — 1,2 В, то при входном напряжении — 1,7 В ток будет протекать через правый транзистор T_2. Таким образом, входному напряжению — 0,7 В соответствует нулевое выходное напряжение, а входному напряжению — 1,7 В соответствует напряжение на выходе, равное — 1 В.

Схема с отличающимися входными и выходными уровнями не может использоваться в качестве логического элемента. Для устранения этого недостатка выход схемы присоединяется к базе эмиттерного повторителя. Выходное напряжение эмиттерного повторителя на 0,7 В меньше напряжения на базе за счет падения напряжения на переходе база — эмиттер. В этом случае входные и выходные уровни принимают два значения: — 0,7 В и — 1,7 В, т. е. могут использоваться для представления логических «единицы» и «нуля». На рис. 8-19 показан трехвходовой элемент типа ИЛИ с эмиттерной связью. Он отличается от основной схемы токового переключателя двумя транзисторами, включенными параллельно с T_1, и двумя эмиттерными повторителями, присоединенными к выходным сопротивле-

ниям для сдвига выходного уровня. Выходу ИЛИ соответствует правый эмиттерный повторитель, а выходу НЕ — ИЛИ — выход левого повторителя. Логические элементы с эмиттерными связями потреб-

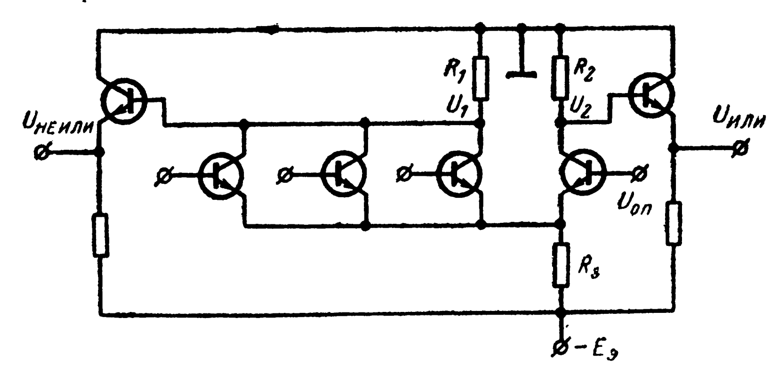


Рис. 8-19. Трехвходовой логический элемент ИЛИ с эмиттерной связью.

ляют большую мощность по сравнению с насыщенными схемами, но имеют гораздо большее быстродействие.

ВОПРОСЫ

1. **Насыщенные схемы имеют меньшее быстродействие по сравнению с ненасыщенными из-за влияния . . . .**
2. **Работа токового переключателя основана на управлении током, протекающим через параллельные транзисторы, с помощью входного . . . .**
3. **В схемах с эмиттерной связью используются эмиттерные повторители для обеспечения равенства выходных и . . . . логических уровней.**

ОТВЕТЫ

1. Насыщенные схемы имеют меньшее быстродействие по сравнению с ненасыщенными из-за влияния **времени рассасывания.**
2. Работа токового переключателя основана на управлении током, протекающим через параллельные транзисторы, с помощью входного **напряжения.**
3. В схемах с эмиттерной связью используются эмиттерные повторители для обеспечения равенства выходных и **входных** логических уровней.

Логические схемы на МОП-транзисторах. Относительная простота изготовления транзисторов со структурой металл-окисел-полупроводник (МОП-транзисторов с полевым эффектом) открывает широкие возможности для создания на их основе сложных логических устройств (рис. 8-20).

В схеме используются МОП-транзисторы с p-каналом. Эти транзисторы имеют очень высокое сопротивление до тех пор, пока к затвору не приложено достаточно большое отрицательное напряжение. Сопротивление резистора R много меньше сопротивления МОП-приборов в закрытом состоянии, поэтому при нулевом входном напряжении, когда через резистор ток не протекает, выходное напряжение равно напряжению источника. Если на затвор любого МОП-транзистора подать соответствующее отрицательное напряжение, то его

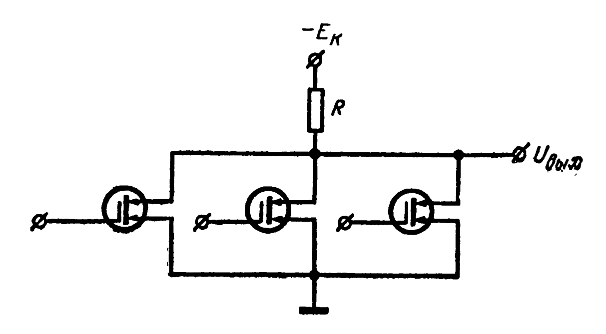


Рис. 8-20. Трехвходовой МОП-элемент.

сопротивление становится гораздо меньше сопротивления нагрузки и выходное напряжение уменьшается до величины, близкой к нулю. Логические уровни «единица» и «нуль» в этом случае соответствуют напряжению источника питания и потенциалу земли.

8-3. ЛИНЕЙНЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ

Необходимость применения катушек индуктивности и конденсаторов больших номиналов в обычных линейных схемах ограничивало проектирование линейных цепей в микроминиатюрной форме. Применение дискретных элементов и гибридных тонкопленочных схем частично решило эту проблему. Учет специфических особенностей технологии кремниевых интегральных схем и создание новых принципов построения линейных схем без больших номиналов катушек индуктивности и конденсаторов позволили положительно решить этот вопрос.

Усилительные схемы. На рис. 8-21 показан принцип построения простейшего усилительного каскада — дифференциального усилителя. Эта схема имеет ряд достоинств по сравнению с другими усилительными каскадами с точки зрения изготовления в интегральной форме. Так, например коэффициент усиления дифференциального усилителя не зависит от абсолютной величины сопротивления резисторов, а определяется их отношением. Соответствующий контроль допусков при изготовлении масок позволяет выдерживать эту величину с достаточной точностью.

Динамические параметры дифференциального усилителя слабо зависят от влияния паразитных емкостей изолирующих переходов, и поэтому дифференциальный усилитель имеет лучшие частотные ха-

рактеристики, чем простой транзисторный каскад. Другой важной особенностью дифференциального усилителя является то, что его коэффициент усиления может регулироваться путем изменения тока, протекающего через эмиттерный резистор. Тот факт, что в простейшей схеме используются два, а не один транзистор, не является принципиальным вследствие специфики изготовления интегральных схем.

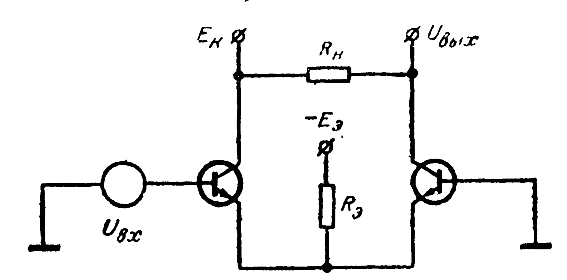


Рис. 8-21. Схема дифференциального усилителя.

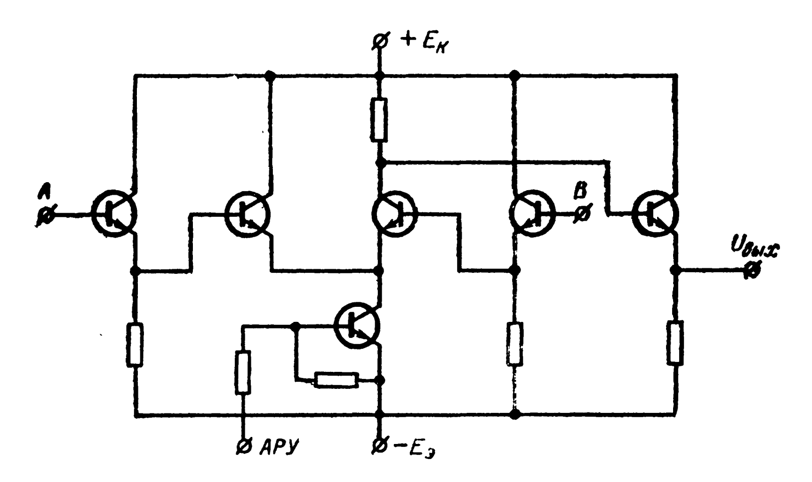


Рис. 8-22. Однокаскадный дифференциальный усилитель.

На рис. 8-22 показан реальный однокаскадный усилитель, построенный на дифференциальном принципе. На входах и выходе схемы добавлены эмиттерные повторители для повышения входного и снижения выходного сопротивлений. Кроме того, резистор в эмиттерной цепи дифференциальной пары заменен транзисторным каскадом. Вход этого каскада соединен с системой автоматического регулирования усиления (АРУ), с помощью которой можно менять ток в дифференциальных транзисторах и тем самым регулировать коэффициент усиления каскада.

ВОПРОС

Широкое использование дифференциального усилителя в интегральных схемах объясняется тем, что при его изготовлении нет необходимости в точном контроле номиналов . . . . и характеристики усилителя менее чувствительны к влиянию . . . . на подложку.

ОТВЕТ

Широкое использование дифференциального усилителя в интегральных схемах объясняется тем, что при его изготовлении нет необходимости в точном контроле номиналов **резисторов и** характеристики усилителя менее чувствительны к влиянию **емкостей** на подложку.

Синтез простейших дифференциальных усилительных каскадов в основной «строительный блок» интегральных линейных систем показан на рис. 8-23. Приведенная схема носит название операционно-

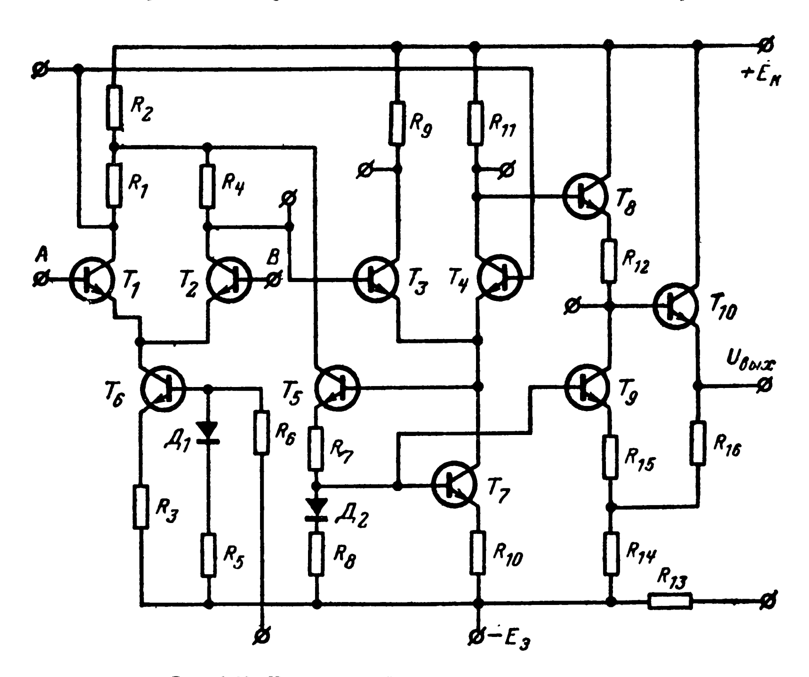


Рис. 8-23. Интегральный операционный усилитель.

го усилителя. Два дифференциальных усилительных каскада вместе с дополнительными схемными элементами обеспечивают соответствующую температурную стабильность, необходимые величины входных

и выходных сопротивлений и возможность присоединения подстроечных элементов

Создание линейных интегральных систем ведется по двум направлениям. Прежде всего это использование простейших усилительных каскадов для получения заданных функций с помощью подключения к ним различных внешних элементов. При этом вся система создается на основе одних и тех же простейших интегральных схем. Стандартизация каскадов позволяет успешно использовать их в больших количествах для систем относительно небольшого объема.

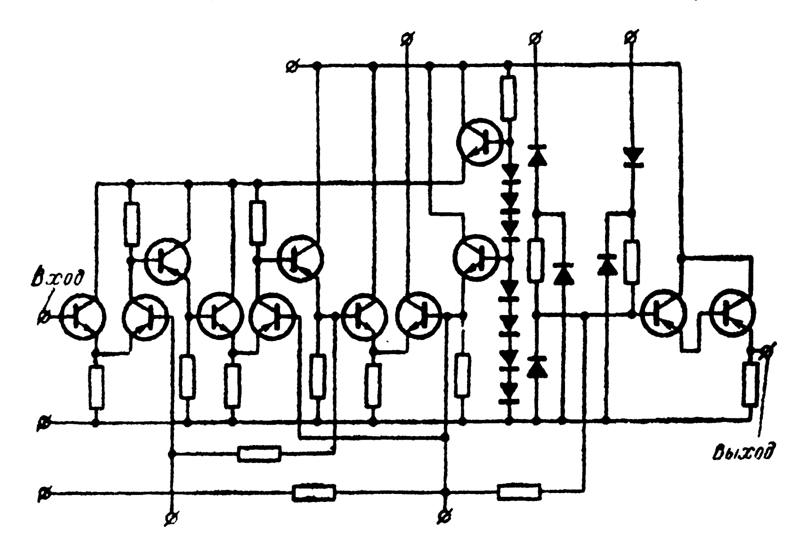


Рис. 8-24. Интегральный усилитель-дискриминатор.

Второй путь относится к схемам, которые выполняют функции, имеющие очень широкое распространение, и требуются в очень больших количествах. Примерами этих схем могут быть радио- и телевизионные приемники. В этом случае целесообразно размещать всю функциональную схему в одном корпусе. Большие затраты на разработку таких сложных схем могут окупиться широким спросом и уменьшением стоимости корпуса на одну выполняемую функцию. Схема на рис. 8-24 принимает высокочастотный сигнал, усиливает его, ограничивает, подает на внешний трансформатор и преобразует в звуковой сигнал. Система может использоваться в звуковых каналах радио- и телевизионных приемников.

8-4. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ МИНИТМЕН-II

Размеры и высокая надежность интегральных схем послужили причиной их использования в сложных электронных системах. Одной из первых таких систем большого объема является система управления ракетой Минитмен-II.

Интегральные схемы использовались для создания цифровой, линейной и запоминающей секций бортовой вычислительной машины Минитмен. Более 93% всех электронных функций в этой вычислительной машине выполняется с помощью интегральных схем.

Корпус интегральных схем. На рис 8-25 показан корпус для всех интегральных схем, используемых в бортовой машине Минитмен. Исключение составляют лишь мощные каскады. Корпус позво-

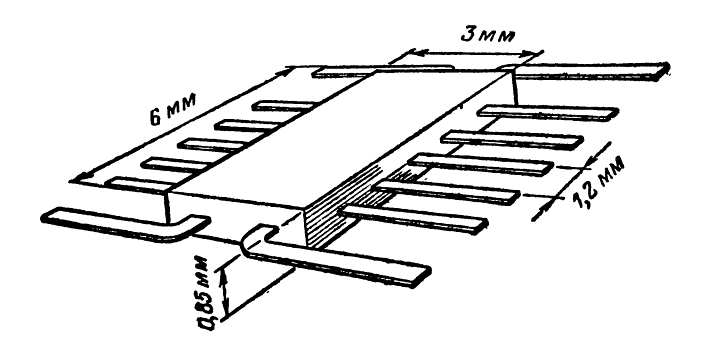


Рис. 8-25. Корпус интегральной схемы.

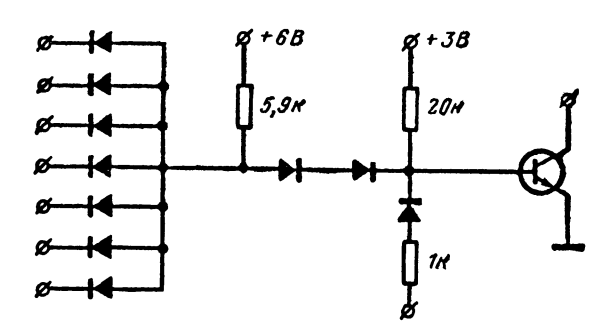


Рис. 8-26. Схема логического элемента НЕ—И.

ляет приваривать схемы поверх печатной платы. Этот путь был выбран, чтобы обеспечить максимальную надежность и уменьшить занимаемый объем.

Схемы системы Минитмен. Для выполнения функций системы Минитмен требуется большое количество разнообразных схем. В системе применены дифференциальные усилители, используемые по их прямому назначению — для усиления сигнала с дифференциальных входов с коэффициентом усиления более 2000. Другие линейные схемы служат в качестве предусилителей для передачи сигнала на вход усилителей мощности. Дополнительные схемы были созданы для модуляции переменного сигнала. Цифровые схемы, используемые в Минитмен, имели структуру ДТЛ.

Основной семивходовой логический элемент типа НЕ — И показан на рис. 8-26. Другие логические элементы, входящие в серию цифровых схем Минитмен, включают триггер, два четырехвходовых элемента, три инвертора, входные и выходные цепи. Последние схемы необходимы вследствие того, что логические уровни в цифровых схемах отличны от уровней в других частях системы. Входные и выходные схемы обеспечивают уменьшение входных переключающих сигналов до логических уровней и увеличение логических уровней до больших выходных сигналов.

ВОПРОСЫ

1. Передача информации в цифровых вычислительных машинах осуществляется с помощью логических элементов. Логические элементы могут быть собраны на основе большого количества разнообразных схем.

а) Базовыми логическими элементами в вычислительных машинах являются элементы типа . . . . и . . . .

б) Функция триггера состоит в хранении информации в виде логических . . . . и . . . .

2. Создание интегральных схем для линейных систем требует разработки усилительных элементов в качестве универсальных «строительных блоков».

а) Различные виды интегральных цифровых схем включают . . . . логики, ... и . . . . -логику.

б) Схема, наиболее часто используемая для проектирования линейных интегральных систем, называется . . . . усилителем.

ОТВЕТЫ

1. *а*) Базовыми логическими элементами в вычислительных машинах являются элементы типа **И, ИЛИ** и **инверторы.**

   б) Функция триггера состоит в хранении информации в виде логических **0** и **1**.

2. *а*) Различные виды интегральных цифровых схем включают **РТЛ, ДТЛ, ТТЛ**-логики, **токовые переключатели** и **МОП**-логику.

   б) Схема, наиболее часто используемая для проектирования линейных интегральных систем, называется **операционным** усилителем.

Глава девятая

ЭКСПЛУАТАЦИЯ МИКРОСХЕМ

С чем Вы познакомитесь в этой главе. Повышение плотности упаковки и сложности схем привело к изменениям в эксплуатации и технике ремонта современного микроэлектронного оборудования. Настоящая глава посвящена рассмотрению некоторых вопросов экс-

плуатации и обслуживания миниатюрного электронного оборудования. Рассмотрены механические и климатические условия работы микросхем, обсуждены некоторые профилактические меры при их эксплуатации и способы замены поврежденных частей.

9-1. НЕОБХОДИМЫЕ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ

Плотная упаковка и малые размеры миниатюрных электронных элементов делают необходимым создание средств для защиты схем от механических воздействий, подобных вибрациям и ударам. Использование многослойных печатных плат, тонких пленок и гибридных схем приводит к появлению новых источников отказов, ранее не встречавшихся в дискретных системах.

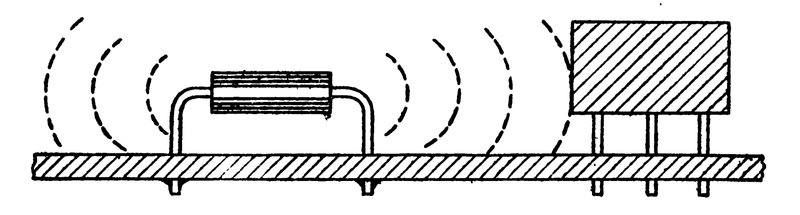


Рис. 9-1. Воздействие излучения.

Механические воздействия. Амортизаторы уменьшают влияние вибраций и ударов на работу отдельных подсистем. Для предохранения от воздействий механических перемещений часто используются «заливные» блоки. Простейший путь изготовления таких блоков состоит в «заливке» схемы парафином. При этом обеспечивается надежная механическая прочность при нормальной температуре и возможность замены неисправных элементов, так как парафин при желании легко может быть удален. Кроме парафина с этой же целью используются различные кремниевые соединения, обеспечивающие изоляцию и необходимую прочность. При использовании эпоксидной смолы следует принимать специальные предосторожности с тем, чтобы разница в температурных коэффициентах линейного расширения элементов и окружающей их смолы не создавала чрезмерных тепловых напряжений.

Температура. Подобно механическим воздействиям температура может нарушить нормальное функционирование электронного оборудования. Плотная упаковка компонентов приводит к увеличению мощности рассеяния на единицу объема и ухудшению условий отвода тепла.

Для улучшения теплоотвода используются специальные каркасы из хорошо проводящих тепло материалов, таких как алюминий или медь. Нанесение полосок меди на обратную сторону печатных плат улучшает теплоотдачу, а поток воздуха между отдельными платами увеличивает эффективность конвекции. Иногда аппаратуру помещают в жидкий фреон, который имеет низкую температуру кипения и поэтому является эффективным средством для отвода тепла.

Излучение. Электромагнитные волны, возникающие при протекании тока в каком-либо элементе, могут наводить сигнал помехи в соседнем участке схемы (рис. 9-1). Этот эффект особенно сильно проявляется при плотном монтаже. Поэтому в электронной аппаратуре должна быть предусмотрена соответствующая защита от электромагнитного излучения.

В аппаратуре космического применения важен другой вид излучения. Космические лучи и проникающая радиация могут ионизовать газообразную атмосферу, в которой находятся схемы. В результате уменьшается напряжение пробоя между соседними элементами. При использовании полупроводниковых триодов и диодов необходимо, кроме того, учитывать изменение характеристик этих элементов в условиях длительного воздействия радиации.

ВОПРОСЫ

1. **Для микроэлектронной аппаратуры представляют опасность такие механические воздействия, как . . . . и . . . .**
2. **Парафин удобно использовать для «заливки» электронных блоков, так как он может быть легко удален при . . . . элементов.**
3. **Фреон является эффективным охлаждающим средством, так как имеет низкую температуру . . . .**
4. **В космической аппаратуре ионизация, возникающая в результате воздействия космического излучения, уменьшает . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Для микроэлектронной аппаратуры представляют опасность такие механические воздействия, как **вибрации** и **удары.**
2. Парафин удобно использовать для «заливки» электронных блоков, так как он может быть легко удален при **замене** элементов.
3. Фреон является эффективным охлаждающим средством, так как имеет низкую температуру **кипения.**
4. В космической аппаратуре ионизация, возникающая в результате воздействия космического излучения, уменьшает **напряжение пробоя.**

Окружающая среда. Окружающая среда, в которой работает электронное оборудование, является важнейшим фактором при проектировании систем. На рис. 9-2 показаны некоторые специфические условия, в которых могут работать микроэлектронные схемы.

Высокий вакуум в космической аппаратуре ставит проблемы отвода тепла и уменьшения напряжения пробоя при воздействии проникающей радиации. Если система имеет движущиеся части, например в магнитофоне, то испарение смазки может привести к затруднению движения из-за возникновения трения между поверхностями. По этим причинам космическая аппаратура герметизируется в атмосфере какого-либо газа. Малые размеры микросхем позволяют делать это в относительно небольших объемах. Воздействие влаги является очень важным условием при работе электронного оборудования в тропическом климате. Герметизация подсистем в этом случае не

только защищает от высокой температуры и повышенной влажности такие компоненты, как тонкие пленки и полупроводниковые кристаллы, но и предотвращает окисление соединительных проводов и нарушение контактов между различными металлами. Поэтому в ответственной аппаратуре часто используются позолоченные выводы.

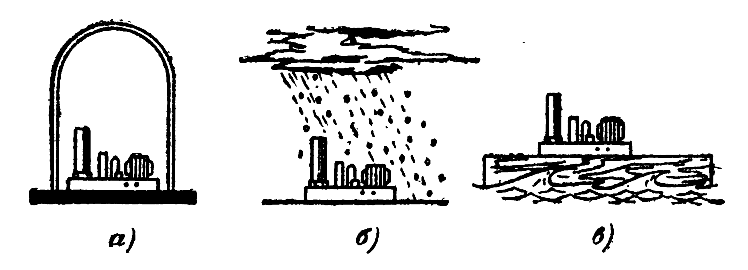


Рис. 9-2. Окружающая среда.
а — вакуум; б — влага; в — соль.

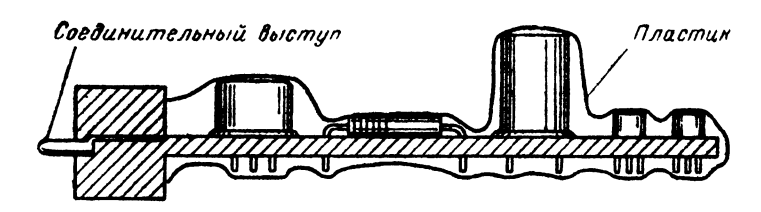


Рис. 9-3. Покрытие пластиком.

Присутствие в окружающей среде соли создает наиболее вредные условия для работы электронного оборудования. Этот случай встречается в морских системах. Использование специальных покрытий эффективно только в течение короткого периода времени. Проникновение проводящего раствора соли через микроскопические дефекты в покрытиях приводит к возникновению электролитической коррозии, которая может вывести из строя электронное оборудование в течение нескольких часов. Влияние коррозионных эффектов может быть уменьшено с помощью герметизации отдельных схем пластиком (рис. 9-3). Подобное покрытие уменьшает коррозию и улучшает прочность механического соединения элементов с платой.

ВОПРОСЫ

1. **В условиях высокого вакуума затрудняется работа движущихся частей систем вследствие увеличения . . . .**
2. **Электронное оборудование, рассчитанное на работу во влажной атмосфере, как правило, используется в . . . . условиях.**

3. **Для уменьшения коррозии часто используются . . . . выводы.**
4. **Наиболее вредные условия для работы электронного оборудования связаны с присутствием в окружающей среде . . . .**

ОТВЕТЫ

1. В условиях высокого вакуума затрудняется работа движущихся частей систем вследствие увеличения **трения.**
2. Электронное оборудование, рассчитанное на работу во влажной атмосфере, как правило, используется в **тропических** условиях.
3. Для уменьшения коррозии часто используются **позолоченные выводы.**
4. Наиболее вредные условия для работы электронного оборудования связаны с присутствием в окружающей среде **соли.**

9-2. ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Наиболее эффективный способ увеличения срока службы электронной системы состоит в обнаружении возможных дефектов на этапе проектирования с тем, чтобы исключить заранее эти дефекты с помощью внесения соответствующих изменений в проект и более тщательной отбраковки составных элементов. Исключить все возможные дефекты, естественно, никогда не удается и никакой подбор элементов не может полностью гарантировать их безупречную работу.

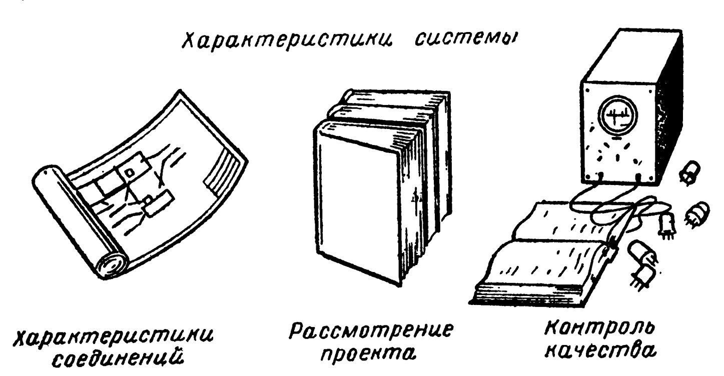


Рис. 9-4. Обеспечение надежности системы.

Однако можно считать доказанным, что чем больше усилий сделано в этом направлении, тем выше надежность схем. В случае обычных наземных систем улучшение надежности может быть достигнуто за счет введения дополнительного относительно недорогого ухода за оборудованием, которое может заключаться в замене ламп, проверке схем с помощью измерительных приборов, использовании запасных частей и т. п.

Для микроэлектронного оборудования обнаружение и ремонт неисправности в готовой системе представляет собой сложную задачу и требует высокой квалификации. Высокая плотность монтажа затрудняет доступ к отдельным узлам схемы. Даже в случае обнаружения неисправного элемента его замена, особенно при использовании «заливных» блоков, часто невозможна без замены большей части системы. В некоторых случаях, например в космическом и ракетном оборудовании, ремонт вообще исключен. В этих условиях большое значение приобретают профилактические работы по уходу за оборудованием.

Для обеспечения надежной работы системы необходимо правильно составить проект, осуществить контроль надежности и качества элементов и их соединений (рис. 9-4). Решение этих вопросов является основой безотказной работы электронной системы.

Рассмотрение проекта. Рассмотрение проекта включает анализ электронных функций, выполняемых системой, учет влияния окружающей среды, в которой система будет работать, рассмотрение условий отвода тепла и формулировку требований к мощности источников питания. Разброс номиналов элементов, введение резервирования, выбор способа получения соединений между элементами, выбор материала для «заливки», проверка работоспособности системы — эти вопросы являются важными при рассмотрении проекта системы.

ВОПРОСЫ

1. **Для обеспечения качественного профилактического обслуживания необходимо предвидеть возможные . . . . на этапе проектирования системы.**
2. **Надежность системы определяется уровнем . . . . , использованием качественных . . . . и их надежным . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Для обеспечения качественного профилактического обслуживания необходимо предвидеть возможные **дефекты** на этапе проектирования системы.
2. Надежность системы определяется уровнем **проектирования**, использованием качественных **элементов** и их надежным **соединением**.

Надежность элементов. Требования, предъявляемые к параметрам элементов, должны быть выполнимы имеющимися в распоряжении технологическими средствами.

Предположим, что в схеме имеются определенные ограничения на минимальную величину усиления транзисторов, а используемая технология позволяет изготовлять транзисторы, коэффициент усиления которых имеет распределение, показанное на рис. 9-5. Из рисунка следует, что коэффициент усиления изменяется от 30 до 80, а среднее значение равно 50. В этом случае было бы неправильно устанавливать минимальную величину коэффициента усиления, равную 70. Только небольшое количество транзисторов, соответствующее зачерненной области на рисунке, будет удовлетворять этому условию. Поэтому в схеме может быть использована лишь малая доля общей продукции и стоимость оборудования существенно возрастет.

Однако это не главная проблема. Транзисторы, соответствующие правой и левой ветвям распределения, получаются из-за случайных изменений в технологическом процессе. Поэтому незначительное изменение основного производственного цикла может привести к полной невозможности их изготовления. Кроме того, так как причины появления таких элементов точно не выяснены, их надежность весьма сомнительна. Если коэффициент усиления повышается из-за разброса проводимости используемого материала, то это не очень страшно. Если же на коэффициент усиления влияет влажная атмосфера в корпусе, то использование такого рода элементов было бы крайне рискованным.

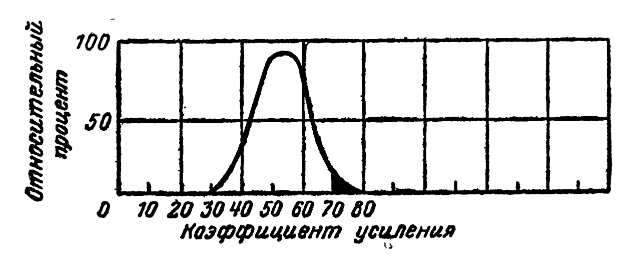


Рис. 9-5. Разброс коэффициента усиления транзисторов.

Если требования к элементам и технологические возможности не согласуются друг с другом, то следует пересмотреть структуру электронной системы и попытаться найти другие пути решения поставленных задач, например с помощью использования большего числа элементов, имеющих менее жесткие ограничения на параметры. Если такое решение найти не удается, то необходимо попытаться изменить технологию производства таким образом, чтобы новые технологические операции не были слишком рискованными в смысле дополнительного ухудшения надежности.

ВОПРОСЫ

1. **Для обеспечения надежной работы элементов прежде всего необходимо сформулировать разумные . . . . к их параметрам.**
2. **Элементы, номиналы которых значительно отличаются от нормального распределения, получаются из-за . . . . изменений в технологическом процессе.**
3. **Так как производственные причины появления таких элементов не выяснены, то их . . . . весьма сомнительна.**

ОТВЕТЫ

1. Для обеспечения надежной работы элементов прежде всего необходимо сформулировать разумные **требования** к их параметрам.
2. Элементы, номиналы которых значительно отличаются от нормального распределения, получаются из-за **случайных** изменений в технологическом процессе.

3. Так как производственные причины появления таких элементов не выяснены, то их надежность весьма сомнительна.

Уровень производства. Технология производства элементов должна соответствовать условиям, при которых изготовляемая система будет функционировать. Например, элементы системы для исследования космического пространства должны сохранять работоспособность в широком диапазоне температур. Они должны выдерживать механические перегрузки, которые имеют место при пуске ракеты, и сохранять работоспособность в условиях вакуума. Если элементы не удовлетворяют одному из этих условий, то их использование в системе нецелесообразно, если не будут приняты специальные меры по их защите от ударов, теплоизоляции и герметизации в газонаполненном пространстве.

Очень важно при выборе элементов иметь информацию об их использовании в других системах и условиях. Например, ряд фирм изготовляют элементы, уже проверенные в бортовых системах ракеты Минитмен и космического корабля Аполлон. Элементы этих фирм могут с успехом использоваться в аналогичных системах до тех пор, пока отлаженный технологический процесс не претерпит серьезных изменений.

Для повышения надежности часто используется «тренировка» элементов. Процесс «тренировки» заключается в том, что элементы работают при заданных условиях в течение 100 ч. Этот процесс известен также как процесс старения или приработки. Показано, что большое количество сбоев связано с производственными дефектами, которые проявляются в течение первых 100 ч эксплуатации. «Тренировка» позволяет выявить потенциально ненадежные элементы до присоединения их в систему. Этот процесс достаточно дорогой, но доказал свою эффективность во многих системах.

ВОПРОСЫ

1. **Полупроводниковые приборы выходят из строя в основном из-за производственных . . . .**
2. **Максимальную надежность имеют приборы с . . . . технологией производства.**
3. **Уровень производства элементов должен соответствовать требованиям изготовляемых электроных . . . .**

ОТВЕТЫ

1. Полупроводниковые приборы выходят из строя в основном из-за производственных **дефектов.**
2. Максимальную надежность имеют приборы с **отработанной** технологией производства.
3. Уровень производства элементов должен соответствовать требованиям изготовляемых электронных **систем.**

9-3. МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ОТКАЗОВ

Обнаружение неисправности в обычном электронном оборудовании достаточно просто, так как в нем имеется доступ практически ко всем точкам любой схемы. Изготовление таких тестовых точек в микросхемах привело бы к увеличению числа выводов и ограничению

гибкости корпусов, что в свою очередь свело бы на нет основные достоинства микроэлектронной технологии. Поэтому в микросхемах практически невозможно обнаружить неисправный элемент.

Один из методов обнаружения и анализа дефектов в микроэлектронных системах состоит в том, что к системе подключается напряжение питания и на ее вход по программе, заложенной в вычислительную машину, подаются определенные сигналы. Выходные сигна-

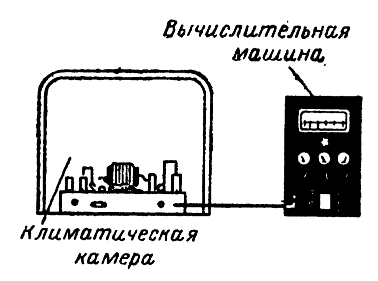


Рис. 9-6. Проверка работоспособности микроэлектронной системы.

лы анализируются вычислительной машиной и сравниваются с теми, которые соответствуют нормальному функционированию системы. Хорошая диагностическая программа позволяет выявить неисправные каскады и определить природу дефектов. На рис. 9-6 показано использование этого метода для анализа работоспособности системы.

Интересная методика обнаружения дефектов в плоских микроэлектронных подсистемах основана на использовании инфракрасного детектора, который может определять температуру на подложке с точностью выше 1 °С и имеет разрешающую способность менее сотых долей миллиметра. Детектор сканирует работающую схему и выявляет дефекты по «горячим областям», которые соответствуют локальному перегреву подложки.

9-4. ЗАМЕНА И РЕМОНТ

Отдельные элементы в микроэлектронных системах не ремонтируются. Функциональные блоки, используемые для построения системы, заменяются целиком.

При использовании полупроводниковых интегральных схем ремонт аппаратуры заключается в замене корпусов на печатной плате. Выводы корпусов располагаются таким образом, чтобы оставался необходимый зазор между контактными площадками. Удаление корпуса в этом случае не представляет особого труда, так как выводы откусываются и отпаиваются поочередно. Если зазор между выводами мал, то требуется специальный инструмент для подогрева всех выводов одновременно.

ВОПРОСЫ

1. **При проектировании микроэлектронных систем следует рассматривать не только габариты и электрические параметры, но и такие характеристики систем, как надежность, стоимость и эксплуатационные свойства.**

а) Оценка условий, в которых система будет эксплуатироваться, состоит в анализе механических . . . . , ... диапазона работы и влияния . . . .

б) Сложность и дороговизна ремонта обусловливают большую роль . . . . работ для микроэлектронных систем.

2. Обнаружение дефекта в обычном оборудовании достаточно просто, так как в нем имеется доступ ко всем точкам схемы. Применение к микросхемам обычных методов обнаружения отказов приводит к необходимости увеличения количества их выводов.

а) Увеличение количества выводов ухудшает . . . . корпусов, используемых для микросхем.

б) . . . . выявляет «горячие области», которые соответствуют локальному перегреву подложки.

ОТВЕТЫ

1. а) Оценка условий, в которых система будет эксплуатироваться, состоит в анализе механических **воздействий, температурного** диапазона работы и влияния **окружающей среды.**

   б) Сложность и дороговизна ремонта обусловливают большую роль **профилактических** работ для микроэлектронных систем

2. а) Увеличение количества выводов ухудшает **гибкость** корпусов, используемых для микросхем.

   б) **Инфракрасный детектор** выявляет «горячие области», которые соответствуют локальному перегреву подложки.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. «Штабельный» метод миниатюризации является примером . . . .
   а) использования микромодулей
   б) повышения плотности монтажа
   в) использования интегральных схем
   г) использования тонких пленок
2. Максимальная плотность монтажа в микроэлектронике достигается за счет применения . . . . .
   а) «штабельных модулей»
   б) пластиковых корпусов
   в) интегральных схем
3. Современное развитие микроэлектроники берет начало с изобретения . . . . . .
   а) транзистора
   б) вакуумной радиолампы
   в) магнитного кольца
   г) криотрона
4. Плотная упаковка электронных элементов уменьшает надежность оборудования из-за увеличения . . . . . .
   а) температуры
   б) количества соединений
   в) массы

5. По мере увеличения количества корпусов надежность системы . .
   а) увеличивается
   б) уменьшается
   в) остается прежней
6. Система, использующая как интегральные, так и дискретные элементы, называется . . . . . .
   а) полупроводниковой системой
   б) гибридной системой.
7. Основные функции корпуса заключаются в защите схемы от коррозии, обеспечении внешних соединений и . . . . .
   а) экранировании
   б) отводе тепла
   в) герметичности
8. Правильно изготовленный полупроводниковый прибор может функционировать . . . .
   а) десять лет
   б) пять лет
   в) десять тысяч часов
   г) неопределенно долго
9. Главный источник отказов систем связан с проблемой изготовления . . . . .
   а) соединений между элементами
   б) резисторов
   в) транзисторов
   г) катушки индуктивности
10. Увеличение надежности систем с помощью введения добавочных элементов называется . . . .
   а) экономической эффективностью
   б) резервированием
   в) расточительством.
11. Элементы интегральных схем теряют свою индивидуальность как . . . . . .
   а) полупроводниковые компоненты
   б) дискретные элементы
12. Материал, обеспечивающий механическое крепление элементов схемы, называется . . . .
   а) подложкой
   б) полупроводником
13. Перспективы уменьшения стоимости полупроводниковых интегральных схем связаны с тем, что все элементы и соединения между ними изготовляются . . . .
   а) с использованием алюминия
   б) надежно
   в) одновременно
14. Работа криотрона основывается на явлении . . . . . .
   а) инжекции дырок
   б) сверхпроводимости
   в) рекомбинации
   г) диффузии примеси
15. Отвод тепла от поверхности прибора осуществляется главным образом за счет . . . . . .
   а) проводимости
   б) конвекции
   в) излучения

16. Минимальные размеры электронных элементов определяются . .
а) стоимостью
б) рассеянием мощности
в) неточностью производственных процессов

17. Примерами активных приборов могут быть электровакуумные лампы, диоды и . . . . .
а) транзисторы
б) резисторы
в) конденсаторы
г) катушки индуктивности

18. Плотность упаковки схем на дискретных элементах увеличивается за счет использования . . . . . .
а) многослойных плат
б) магнитных колец

19. Примером систем на дискретных элементах с упорядоченной геометрией служат . . . . . .
а) «штабельные» системы
б) схемы ракеты Минитмен II
в) тонкопленочные ячейки памяти
г) микромодульные системы

20. Элементы могут присоединяться к поверхности печатной платы способом . . . . . .
а) пайки
б) скручивания провода
в) сварки с параллельными электродами.

21. Термин «тонкие» пленки относится к пленкам с толщиной порядка . . . . . .
а) одной сотой миллиметра
б) десяти нанометров
в) одной десятитысячной миллиметра.

22. Давление парообразования испаряющегося материала в вакуумной системе увеличивается за счет . . . .
а) подогрева
б) конвекции
в) легирования
г) очистки

23. Испарение материалов с высокой температурой плавления осуществляется . . . . . .
а) подогревом
б) откачиванием
в) катодным распылением

24. Простейший путь осаждения пленок с заданной геометрией состоит в использовании . . . . . .
а) травления
б) механических масок
в) диффузии
г) лазерной техники

25. К пассивным пленочным элементам относятся резисторы и . . .
а) транзисторы
б) диоды
в) индуктивности
г) конденсаторы

26. Сопротивление тонкопленочного резистора определяется его геометрическими размерами и .... пленки.
а) толщиной
б) сопротивлением слоя
в) проводимостью

27. Тонкопленочные активные приборы получаются на основе ....
а) биполярных транзисторов
б) керамических структур
в) полевых транзисторов
г) параметрических структур

28 Работа магнитной памяти основана на использовании материалов с ......
а) прямоугольной петлей гистерезиса
б) ферромагнитным резонансом
в) сверхпроводящими свойствами
г) полупроводниковыми свойствами

29. Действие магнитного поля на сверхпроводящий материал приводит к появлению ....
а) нестабильности
б) разрушений
в) индуктивности
г) сопротивления

30. Для изготовления транзисторов наиболее часто используются германий и ....
а) мышьяк
б) селен
в) кремний
г) натрий

31. Неосновными носителями в материале *n*-типа являются .....
а) электроны
б) дырки

32. Наиболее важными параметрами полупроводниковых материалов являются проводимость и ....
а) емкость
б) время жизни
в) плотность

33. Изготовление полупроводниковых приборов основано на использовании фотолитографии, сплавления, окисления и ......
а) инжекции
б) сварки лучом
в) диффузии
г) уплотнения

34. Планарный процесс позволяет изготавливать активные области транзисторов меньше, чем размеры ....
а) базовой области
б) контактных площадок
в) эмиттерной области

35. Для изготовления интегральных схем на пластине должны быть созданы ....
а) маленькие области
б) электрически изолированные области
в) симметричные области

36. Планарная технология может быть использована для изготовления всех элементов за исключением ......
а) транзисторов
б) резисторов
в) конденсаторов
г) катушек индуктивности

37. Выполнение функций, подобных тем, которые осуществляются отдельными каскадами в одном корпусе осуществляется в ....
а) корпусах с плотной упаковкой
б) больших интегральных схемах
в) гибридных схемах

38. Основным элементом цифровой вычислительной машины является ......
а) логический элемент
б) магнитное кольцо
в) перфоратор

39. Пути создания БИС включают гибридный способ, способ выборочной сборки и ......
а) способ резервирования
б) использование МОП-приборов
в) способ 100%-ного выхода

40. Вся информация в цифровых вычислительных машинах должна быть представлена в форме ....
а) буквенно-цифрового кода
б) чисел
в) букв

41. Логические элементы РТЛ, ДТЛ и ТТЛ построены на основе ..
а) взаимно дополняющих транзисторов
б) МОП-приборов
в) насыщенных схем
г) токовых переключателей

42. Ненасыщенные схемы имеют большее быстродействие, так как в них отсутствует ......
а) время накопления
б) время распространения
в) время рассасывания
г) время спада

43. Линейные схемы, перспективные для использования в интегральном виде вследствие малой чувствительности к разбросу номиналов емкостей и резисторов, называются ......
а) операционными усилителями
б) триггерными схемами
в) релаксационными генераторами
г) дифференциальными усилителями

44. Позолоченные выводы часто используются для .....
а) улучшения внешнего вида
б) борьбы с коррозией
в) облегчения сварки

45. Уровень производства элементов должен соответствовать ....
а) требованиям изготовляемых систем
б) минимальной стоимости элементов

46. Микроэлектронные системы более зависимы от . . . . вследствие сложности замены элементов
   а) составления спецификации
   б) подготовки техников
   в) метода проверки
   г) профилактических работ

47. Использование в интегральных схемах полевых транзисторов со структурой металл-окисел-полупроводник перспективно вследствие их . . . . . .
   а) высокочастотных характеристик
   б) высокого входного сопротивления
   в) относительной простоты изготовления
   г) малого коэффициента шума

48. Главное преимущество использования полупроводниковых интегральных схем заключается в . . . . . .
   а) их высоких характеристиках
   б) их высокой надежности
   в) малых физических размерах
   г) возможности снижения стоимости

ОТВЕТЫ НА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1.б	9.а	17.а	25.г	33.в	41.в
2.в	10.б	18.а	26.б	34.б	42.в
3.а	11.б	19.г	27.в	35.б	43.г
4.а	12.а	20.в	28.а	36.г	44.б
5.б	13.в	21.в	29.г	37.б	45.а
6.б	14.б	22.а	30.в	38.а	46.г
7.в	15.б	23.в	31.б	39.в	47.в
8.г	16.в	24.б	32.б	40.б	48.г

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава пятая

Техника тонких пленок

Глава шестая

Полупроводниковые интегральные схемы

Глава седьмая

Большие интегральные схемы

Глава восьмая

Типовые микроминиатюрные схемы

Глава девятая

Эксплуатация микросхем

Цена 73 коп.